

Grado Universitario en Ingeniería en
Tecnologías Industriales
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Estudio sobre la cinética de secado
de microalgas”

Irene Priego Peña

Tutor

Luis Miguel García Gutiérrez

Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

La presente memoria se basa en el estudio teórico del proceso de secado de las microalgas para su posterior aprovechamiento, a nivel energético, en la generación de biocombustible.

Dentro de este estudio se valorará el modelo más idóneo para poder evaluar y analizar la cinética de secado, tanto para temperaturas constantes, como para temperaturas variables. Extrapolando el modelo más adecuado en el caso de la utilización de temperaturas variables al estudio de la cinética en un secadero solar, en el cual la temperatura variará en función del ciclo solar, también se analizarán las posibles causas de la evolución de esta cinética resultante en distintos puntos geográficos del mundo.

Por otra parte, se llegará a valorar la capacidad de secado de las microalgas para determinadas condiciones atmosféricas y a determinar la influencia tanto de velocidad, como de la presión a la que se encontrará el fluido que se emplea en el dispositivo para el secado de las microalgas.

Palabras clave: Biodiesel, Energía alternativa, Microalgas, Energía Solar, Secadero solar.

INDICE DE CONTENIDOS.

1.- INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Motivación del Trabajo Fin de Grado.....	1
1.2.- Objetivos.....	2
1.3.- Marco regulador.	2
2.-SECADO.....	4
3.-METODOLOGÍA.	7
3.1-Comparativa de los diferentes modelos en la cinética de secado.	8
3.1.1.- Temperatura constante Modelo de Page.	9
3.1.2 Temperatura constante Modelo de Wang and Singh.	10
3.2.- Análisis de datos con temperaturas variables.	12
3.2.1. Modelo de Wang and Singh.	12
3.2.2.- Modelo de Page.....	13
4.- RESULTADOS.....	17
4.1-Estudio de la extracción de vapor de agua de las microalgas en el secadero solar.	17
4.1.1.- Cálculo de la cantidad de vapor de agua extraída en el secadero solar para la velocidad de $U_1 = 0.56$ m/s.....	21
4.1.2.- Cálculo de la cantidad de vapor de agua extraída en el secadero solar para la velocidad de $U_2 = 0.25$ m/s.....	26
4.2.- Estudio de la capacidad máxima de secado de las microalgas.	29
4.2.1.- Cálculo capacidad máxima de secado media.....	31
4.2.1.1.- Cálculo de la capacidad máxima de secado media para la velocidad de $U_1 = 0.56$ m/s.	33
4.2.1.2.- Cálculo de la capacidad máxima de secado media para la velocidad de $U_2 = 0.25$ m/s.	37
4.2.2.- Cálculo de la capacidad máxima de secado en función del tiempo.....	39
4.2.2.1.- Cálculo de la capacidad de secado en función del tiempo para la velocidad $U_1 = 0.56$ m/s.....	39
4.2.2.2.- Cálculo de la capacidad de secado en función del tiempo para la velocidad $U_2 = 0.25$ m/s.....	40
4.3.- Estudio de la influencia de la presión del fluido de trabajo en la capacidad máxima de secado.....	42
4.3.1.- Estudio de la capacidad máxima de secado para $p_1 = 50$ bares.	43
4.3.2.- Estudio de la capacidad de secado para $p_2 = 0.01$ bares.	44
5.- PRESUPUESTO	47

5.1.-Mano de obra	47
5.2.-Material.....	47
5.3.-Licencias de Software.....	48
5.4.- Presupuesto final.	48
6.- IMPACTO SOCIO-ECONOMICO.	49
7.-CONCLUSIONES	50
7.-BIBLIOGRAFIA.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos de partida de la cinética de secado.	9
Tabla 3.2 Resultados modelo de wang and singh.	11
Tabla 3.3 Parámetros modelo de wang and singh.	13
Tabla 3.4 Parámetros modelo de page.	14
Tabla 3.5 Resultados modelo page sin parámetro n.	16
Tabla 4.1 Datos meteorológicos de temperatura e irradiación proporcionados por energyplus [13].	19
Tabla 4.2 Resultados temperatura a la salida del colector en las distintas ciudades para U_1	23
Tabla 4.3 Tiempo que tarda en llegar al 20% humedad para U_1 en las distintas ciudades.	25
Tabla 4.4 Resultados temperatura a la salida del colector en las distintas ciudades para U_2	27
Tabla 4.5 Tiempo en llegar al 20% humedad para U_2 en las distintas ciudades.	28
Tabla 4.6 Tiempo en llegar a un 20% de humedad para ambas velocidades de flujo en las distintas ciudades	28
Tabla 4.7 Datos meteorológicos de humedad relativa proporcionados por energyplus [13].	31
Tabla 4.8 Cálculo de la capacidad máxima de secado media para velocidad de flujo U_1 en las distintas ciudades.	35
Tabla 4.9 Gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero para velocidad de flujo U_1 en las distintas ciudades.	36
Tabla 4.10 Cálculo de la capacidad de secado media para velocidad de flujo U_2 en las distintas ciudades.	37
Tabla 4.11 Gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero para velocidad de flujo U_2 en las distintas ciudades.	38
Tabla 4.12 Resultados capacidad máxima de secado para flujo de aire U_1 a presión de 50 bares.	43
Tabla 4.13 Gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero para velocidad de flujo U_1 a una presión de entrada de 50 bares en las distintas ciudades.	44
Tabla 4.14 Resultados capacidad máxima de secado para flujo de aire U_1 a presión de 0.01 bares.	45
Tabla 4.15 Gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero para velocidad de flujo U_1 a una presión de entrada de 0.01 bares en las distintas ciudades.	45
Tabla 5.1 Costes de mano de obra.	47

Tabla 5.2 Costes de material.....	47
Tabla 5.3 Costes de licencia de software.....	48
Tabla 5.4 Coste final.....	48

INDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 Secadero indirecto del grupo de Tecnologías Apropriadas de la universidad Carlos III de Madrid.	4
Fig.2.2 Clasificación de los secaderos solares obtenida de [6].	5
Fig.3. 1 Evolución del porcentaje de humedad frente al tiempo para 30°C (a) y 90°C (b), obtenidas de Viswanathan y col. (2012) [8].	7
Fig.3.2 Medición y estimación de la evolución de la humedad frente al tiempo para temperatura variable en el proceso de secado para un secadero solar indirecto, obtenida de Blanco-Cano y col. (2016) [9].	8
Fig.3.3 Porcentaje de humedad en función del tiempo según el Modelo de Page para las cuatro temperaturas constantes.	10
Fig.3.4 Comparación del Modelo de Page frente al Modelo de Wang and Singh para las cuatro temperaturas constantes.	11
Fig.3.5 Ajuste cuadrático para los parámetros del Modelo de Wang and Singh.	12
Fig.3. 6 Ajuste cuadrático para los parámetros del Modelo de Page.	13
Fig.3.7 Ecuaciones del Modelo de Page linealizadas considerando la influencia del parámetro n y sin considerarlo.	15
Fig.3.8 Ajuste del Modelo de Page considerando el parámetro n y sin considerarlo para las temperaturas de 30 y 50 grados.	15
Fig.4.1 Esquema del secadero solar analizado.	18
Fig.4.2 Ciclo de temperatura e irradiación para el caso de Valencia.	18
Fig.4.3 Ajuste cuadrático para los valores de temperatura de salida en cada ciudad para una velocidad de flujo de U_1	22
Fig.4.4 Evolución del porcentaje de humedad con respecto el tiempo en función del ciclo solar para cada ciudad para una velocidad de flujo de U_1	25
Fig.4.5 Ajuste cuadrático para los valores de temperatura de salida en cada ciudad para una velocidad de flujo de U_2	26
Fig.4.6 Evolución del porcentaje de humedad con respecto el tiempo en función del ciclo solar para cada ciudad para una velocidad de flujo de U_2	27
Fig.4.7 Esquema del secadero solar situando los puntos a estudiar.	30
Fig.4.8 Humedades medias en las distintas ciudades.	32
Fig.4.9 Temperaturas medias a la entrada del colector (punto 1) en las distintas ciudades.	32
Fig.4.10 Temperaturas medias a la salida del colector (punto 2) en las distintas ciudades para la velocidad de flujo U_1	33

Fig.4.11 Diagrama psicrométrico posicionando los puntos 1, 2 y 3 en el caso de Valencia.	34
Fig.4.12 Gastos máxicos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_1	36
Fig.4.13 Temperaturas medias a la salida del colector (punto 2) en las distintas ciudades para la velocidad de flujo U_1	37
Fig.4.14 Gastos máxicos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_2	38
Fig.4.15 Evolución de las relaciones de humedades inicial y final en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo del aire U_1	39
Fig.4.16 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_1	40
Fig.4.17 Evolución de las relaciones de humedades inicial y final en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo del aire U_2	41
Fig.4.18 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_2	42
Fig.4.19 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_1 a una presión de entrada de 50 bares.	43
Fig.4.20 Gastos máxicos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas en las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_1 a una presión de entrada de 50 bares.	44
Fig.4.21 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_1 a una presión de entrada de 0.1 bares.	45
Fig.4.22 Gastos máxicos de vapor de agua absorbidos en el secadero en distintas en las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_1 a una presión de entrada de 0.01 bares.	46

1.- INTRODUCCIÓN.

1.1 Motivación del Trabajo Fin de Grado.

El modelo energético actual, basado en una alta proporción en el petróleo y en otros combustibles fósiles, empieza a agotarse. Existen algunos problemas que provienen de su uso abusivo, el impacto ambiental con su nefasto efecto sobre el calentamiento global, la inseguridad y oscilación de los precios, el paulatino agotamiento de las reservas y los conflictos entre países, han provocado, en los últimos años, una búsqueda de fuentes de energías alternativas y renovables que rompan con la dependencia del petróleo.

Las energías renovables serán, sin duda, las que liderarán esta nueva fase energética. La energía eólica, junto con la energía solar son las más célebres en estos últimos años, pero a ellas se une una nueva iniciativa, la biomasa y, más concretamente, los combustibles producidos a partir de ella, llamados biocombustibles, que presentan múltiples ventajas, entre ellos el biodiésel. [1]

El biodiésel, según su proceso de obtención a partir del cultivo de productos orgánicos se puede dividir en generaciones. Se denomina de primera generación si parten de biomasa que puede considerarse alimentos de primera instancia, de segunda generación si provienen de deshechos de biomasa y, de tercera generación si provienen de biomasa creada para el único fin de la creación de biocombustible. Una fuente prometedora que surge de la tercera generación de biodiésel es el cultivo de microalgas, ya que son capaces de convertir, de manera eficiente, la luz del sol, el agua y el CO_2 en una variedad de productos adecuados para aplicaciones de energía renovable [2].

Las microalgas son organismos que viven en el agua (dulce o salada) o en ambientes terrestres de elevada humedad y, gracias a la fotosíntesis, son capaces de transformar el CO_2 en O_2 utilizando para ello la energía del sol. Esta energía queda almacenada en sus estructuras biológicas, y es aprovechada posteriormente por los seres que se alimentan de ella.

En el proceso de la fotosíntesis, empleando la energía del sol, se combina el CO_2 atmosférico con el agua y, como resultado, se produce oxígeno que se libera a la atmósfera, y también se producen azúcares que la microalga empleará para producir distintas sustancias como celulosa, que conforma su estructura, aceites, etc. Por otra parte, las microalgas tienen una tasa de multiplicación muy elevada por lo que son capaces de absorber y almacenar una gran cantidad de energía solar.

Para la producción de biodiésel, las microalgas presentan ventajas importantes con respecto a otros productos agrícolas que se emplean en la actualidad: el rendimiento es mucho mayor que el empleado en cualquier otro tipo de materia prima, ya que se desarrollan a gran velocidad y completan su ciclo de vida en un tiempo mucho menor que los cultivos tradicionales, no se emite CO_2 de más a la atmósfera, ya que en el momento de su combustión el CO_2 tomado se libera devolviéndolo al aire, por tanto, se

libera tanto CO₂ como el que el alga tomó en su desarrollo resultando el balance final igual a cero; la producción de biodiésel a partir de microalgas no afecta al mercado de alimentos (al destinarse grandes partidas de cereales para producir bioetanol y biodiésel provoca que estos escaseen y que se eleve su precio), además, otro de los beneficios a tener en cuenta es que para el cultivo de microalgas no se destruyen bosques ni selvas, ya que es posible realizar el cultivo de microalgas en estanques localizados en áreas desérticas o en terrenos improductivos para cualquier otro tipo de vegetal, por lo que se considera a las microalgas como la tecnología verde para la eliminación de contaminantes en las aguas residuales y salinas.

La idea de la utilización de esta tecnología está basada en el aprovechamiento del medioambiente, no sólo se potenciaría el uso de energía limpia, lo cual es un avance para frenar el calentamiento global, sino que además estos seres vivos poseen la capacidad de producir oxígeno y reciclar el agua absorbiendo CO₂.

Una de las problemáticas del uso de las microalgas en la producción de biodiésel es que estos seres vivos se encuentran en la naturaleza con un gran porcentaje de humedad debido a su cultivo en medios acuosos y, para su posible utilización surge la necesidad de realizar un proceso de secado. Este proceso de secado requiere mucha energía, de ahí que se presente el desarrollo de nuevas tecnologías que lo estudien utilizando otra energía renovable, en este caso la energía solar. En el presente trabajo se realiza un estudio sobre la cinética del secado de las microalgas mediante el funcionamiento de un secadero solar.

1.2.- Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Analizar cuál es el modelo más eficiente para el estudio de la cinética de secado en las microalgas, tanto para temperaturas constantes, como para temperaturas variables propias de secaderos solares.
- Analizar distintas variables como la temperatura, presión y humedad relativa para determinar la influencia que tienen en la capacidad de secado de las microalgas.

1.3.- Marco regulador.

Este proyecto de secadero solar debe regirse por la normativa española y europea que a continuación se refiere.

Por otra parte, al tener que llevar a cabo parte de este proyecto en otros países fuera de la Unión Europea, deberá regirse por la normativa homologable aplicable a la que aquí se nombra, que en esos países exista.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. La Constitución Española encomienda a los poderes públicos, como uno de los principios rectores de la política social y económica, velar por la seguridad e higiene en el trabajo. Este mandato constitucional conlleva la necesidad de desarrollar una política de protección de la salud de los trabajadores mediante la prevención de los riesgos derivados de su trabajo.
- Real Decreto 664/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes biológicos durante el trabajo.
- Resolución de 28 de septiembre de 2009, de la Secretaría de Estado de Investigación, por la que se publica el Acuerdo de encomienda de gestión al Instituto Español de Oceanografía para el desarrollo de actividades financiadas con cargo al Fondo Especial del Estado para la Dinamización de la Economía y el Empleo, en lo referido a la producción y desarrollo de cultivo de algas para la captación de anhídrido carbónico y la producción de biocombustibles.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación.
- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. Tiene por objeto evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

2.-SECADO.

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco, según [3]. Este proceso ha adquirido una gran importancia, no sólo por el hecho de ser una fase necesaria a la hora de la creación de biocombustibles, sino por el hecho de que en la industria de la alimentación presenta un ahorro en el presupuesto, debido al descenso de dinero a invertir en la refrigeración de estos, por su disminución en el peso y por su facilitación a la hora de transportarlos, según se describe en [4]. Existen distintos mecanismos para la deshidratación de materia orgánica, pero el secadero convectivo, el secadero solar o el secadero rotativo, son los más utilizados para este fin.

El secadero convectivo es uno de los dispositivos más utilizados en la deshidratación de la conservación de frutas, se trata de utilizar el aire caliente o un gas para secar partículas o alimentos a través de la transferencia de calor por convección. Se determinan varios tipos de secado convectivo según la dirección del fluido que se introduzca por el colector. En primer lugar, de flujo paralelo, en el cual el fluido y el producto húmedo fluye en la misma dirección; de flujo cruzado, en el que el fluido cruza la capa de producto y, por último, a contracorriente, en el cual el fluido fluye en dirección contraria al producto, este último es el más eficiente pero exige que el producto sea termorresistente según [5] y [6]. A continuación, en la Fig. 2.1 se muestra el secadero indirecto del que se dispone en el Grupo de Tecnologías Apropriadas de la Universidad Carlos III de Madrid.



Fig.2.1 Secadero indirecto del grupo de Tecnologías Apropriadas de la universidad Carlos III de Madrid.

En el secador rotativo el flujo de aire puede ser tanto paralelo como a contracorriente, el material se encontrará en continuo movimiento gracias a la rotación del secador, según se refiere en [7].

Por último, el secador solar, un dispositivo que deshidrata los distintos elementos mediante un proceso que se lleva a cabo gracias a la energía solar, por lo que tiene dependencia de la climatología del lugar. La clasificación más general de los secaderos solares se divide en: activos o pasivos, en función de la naturaleza del movimiento del aire y, en directos, indirectos o mixtos, en función la forma de aprovechamiento de la energía solar. Los elementos fundamentales que componen su mecanismo son: la cámara de secado, en la cual se encuentran los productos a secar, el colector, donde el aire es calentado antes de entrar a la cámara de secado, el ventilador, el cual impulsa el aire hacia el colector y, por último, la chimenea, componente fundamental en los secaderos pasivos puesto que favorece la circulación del aire por el interior del secadero debido a la diferencia de presión entre la entrada y la salida, situada a más altura.

Los secaderos solares activos hacen uso de un ventilador para impulsar el aire a través del secadero, su ventaja es que el producto se seca más rápido, pero se necesita hacer uso de la electricidad. En los secaderos solares pasivos el movimiento del aire se induce por fuerzas de flotación al calentarse por convección natural por lo que no requiere electricidad, se inducen caudales bajos de aire en el dispositivo, por tanto, el secado es más lento y, además, requiere chimenea. En los secaderos directos, el producto es expuesto directamente a la radiación solar en la cámara de secado, mientras que, en los secaderos solares indirectos, el aire es calentado en el colector solar antes de pasar a la cámara de secado. El tipo mixto combina ambas modalidades [6]. Los esquemas de esta clasificación pueden mostrarse en la Fig.2.2.

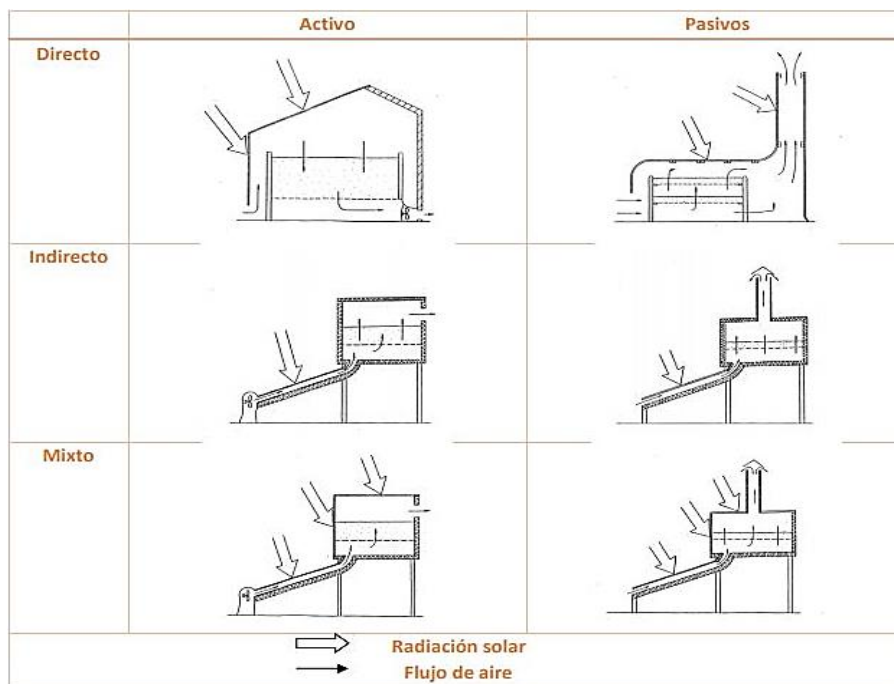


Fig.2.2 Clasificación de los secaderos solares obtenida de [6].

En el presente trabajo se hará uso de un secadero solar indirecto activo, puesto que uno de los objetivos principales es conseguir un proceso de secado que sea lo más rápido posible, por eso se ha elegido, en este caso, un secadero solar activo, también porque se pretende que el producto se encuentre a la mayor temperatura posible, pero, además, se quiere que esté protegido de la radiación solar, por tanto, se ha elegido que además sea un secadero solar indirecto, que aporta todas estas propiedades al secado, debido a la utilización del colector solar.

3.-METODOLOGÍA.

El método de estudio parte de la base inicial de los resultados de cinética de secado de microalgas en un secadero convectivo con una velocidad de flujo cruzado de 0.25 m/s, obtenidos en el trabajo de Viswanathan y col. (2012) [8], en el cual, se investiga el efecto de los métodos de ruptura celular sobre las características de secado y las composiciones lipídicas de algas verdes cultivadas en un estanque abierto. Las muestras de las microalgas se utilizaron para realizar experimentos de secado con cuatro temperaturas constantes del aire: 30°C, 50°C, 70°C y 90°C. La disminución de porcentaje de humedad se registró para cada temperatura (hasta que no se producía más pérdida), obteniendo una curva de este porcentaje de humedad perdida en las microalgas frente al tiempo para cada una de las cuatro temperaturas. En la Fig.3.1 se muestra el ejemplo de la curva de 30°C y de 90°C obtenidas en este trabajo.

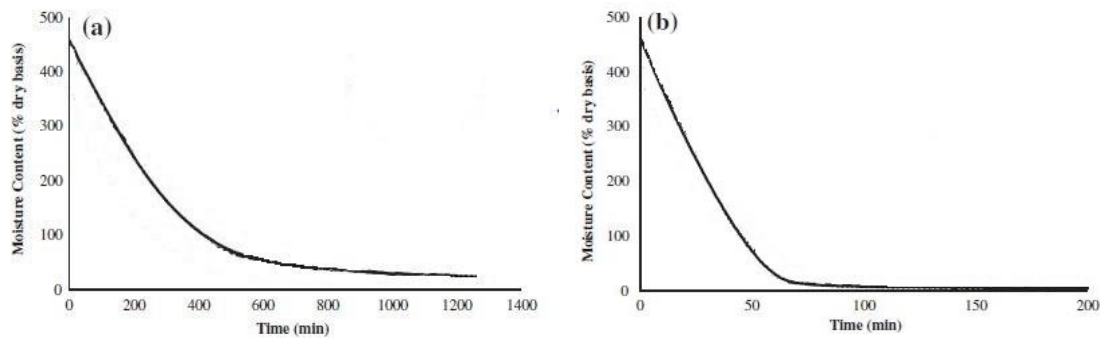


Fig.3. 1 Evolución del porcentaje de humedad frente al tiempo para 30°C (a) y 90°C (b), obtenidas de Viswanathan y col. (2012) [8].

Como lo que se pretende es estudiar la cinética de secado en un secadero solar, se extrapolaron los datos iniciales de cinética de [8] al trabajo de Blanco-Cano y col. (2016) [9], en el que se estudia la cinética de secado para las manzanas Granny Smith. Dicha cinética se determina a través de un estudio termogravimétrico (TGA) del proceso de secado a temperaturas constantes entre 20°C y 50°C. A partir de estos datos se obtuvo una curva del porcentaje de humedad perdida para cada una de las temperaturas, después, se propuso un modelo para predecir la proporción de humedad perdida durante el proceso de secado a temperaturas variables y, este, fue validado con mediciones TGA. Una vez validado el modelo propuesto en la TGA, se aplicó éste al secado de manzanas Granny Smith en un secadero solar indirecto activo, mostrando un gran acuerdo de los resultados experimentales con el modelo. Dicho resultado puede observarse en la Fig.3.2.

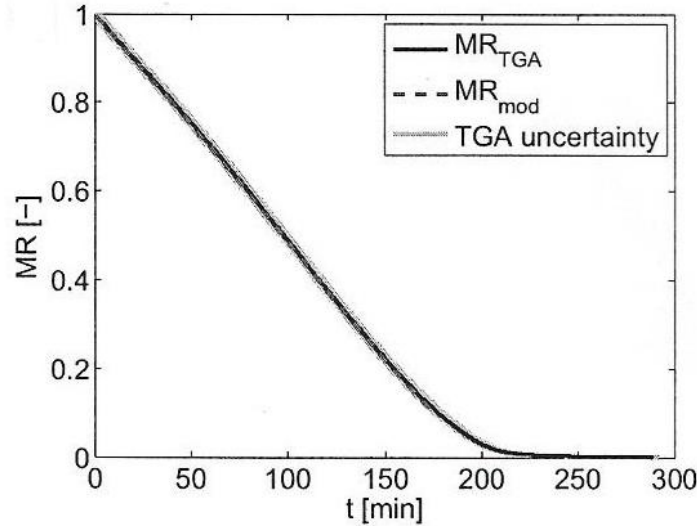


Fig.3.2 Medición y estimación de la evolución de la humedad frente al tiempo para temperatura variable en el proceso de secado para un secadero solar indirecto, obtenida de Blanco-Cano y col. (2016) [9].

En este trabajo, se realizará el estudio de la cinética de secado de las microalgas simulando el uso de un secadero solar indirecto activo, basándose en el modelo propuesto de Blanco-Cano y col. (2016) [9] sobre la predicción de la curva de secado de las manzanas, mediante condiciones de temperatura variables a partir de datos de secado, empleando temperaturas constantes. Por tanto, en este trabajo se partirá de los datos de la cinética de secado de las microalgas a partir de temperaturas constantes obtenidos de Viswanathan y col. (2012) [8]. Para la realización del estudio se analizarán varios modelos cinéticos, determinando cuál es el que mejor se ajusta para el caso de temperaturas e irradiación variables.

Se ha hecho uso del software MATLAB para obtener todos los resultados y figuras expuestas en el presente trabajo.

3.1-Comparativa de los diferentes modelos en la cinética de secado.

La cinética de secado se caracteriza por la relación de humedad, MR (Moisture ratio), un parámetro adimensional que cuantifica la reducción del contenido de humedad de la muestra con el tiempo según [10], [11] y [12]. La relación de humedad se define como:

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.1)$$

Donde $MR=1$ significa que la muestra posee el 100% de la humedad y $MR=0$ que no posee absolutamente nada de humedad. Por lo tanto a medida que se va secando el producto el valor de MR varía desde uno hasta cero.

A continuación, se estudiarán diferentes modelos para la evolución de la relación de humedad en función del tiempo, en primer lugar, para temperaturas constantes y, más

tarde, variables. La cinética de secado está muy asociada al modelo de Thin-layer, que está basado en la transferencia de masas superficiales aplicadas a capas delgadas del producto. Esto supone que la transferencia de masa debida a la difusión en el interior del producto sea despreciable frente a la debida por el paso de una corriente de un fluido (generalmente aire) mediante el mecanismo de convección. En la literatura, existen muchos modelos de Thin-layer, desde ecuaciones exponenciales de una variable libre, hasta ecuaciones polinómicas de varios grados de libertad. Este trabajo se centrará en el modelo descrito por Viswanathan y col. (2012) [8], basado en el conocido Modelo de Page, aunque se comprobará el comportamiento con otros modelos para realizar una adecuada comparativa.

3.1.1.- Temperatura constante Modelo de Page.

El primer modelo estudiado es el Modelo de Page, debido a que los datos de cinética de secado de las microalgas de los que parte el estudio, obtenidos de [8], siguen dicho modelo, el cual se ajusta a la siguiente ecuación exponencial:

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3.2)$$

Siendo:

- MR (*Moisture ratio*).
- k y n parámetros de la curva.
- t , tiempo medido en minutos con un intervalo de 0,5 segundos.

Según la ecuación (3.2), los parámetros libres son k y n tomando un valor diferente para cada temperatura, también, MR tomará distintos valores para cada instante de tiempo.

A continuación, se muestra la tabla 3.1 que contiene los datos de los parámetros libres k y n para las cuatro temperaturas constantes de 30°C, 50°C, 70°C y 90°C, obtenidos de los resultados del trabajo de [8].

TABLA 3.1 DATOS DE PARTIDA DE LA CINÉTICA DE SECADO.

Parámetros	Temperatura de secado			
	30°C	50°C	70°C	90° C
$k(x10)^a$	1.4	2.4	5.0	6.1
n	1.191	1.319	1.291	1.293

Siguiendo este modelo, se puede obtener la evolución de la relación de humedad en las microalgas considerando que para el instante inicial se encuentra el porcentaje máximo de humedad contenida en el producto, es decir $MR=1$. Además, se determina el final del eje de abscisas una vez que la curva llega a estabilizarse, considerando que a partir de dicho punto no se perderá más humedad en el producto. La Fig.3.3. Muestra la

evolución de MR en función del tiempo para las cuatro temperaturas constantes, siguiendo la ecuación (3.2) del Modelo de Page con los datos de la tabla 3.1.

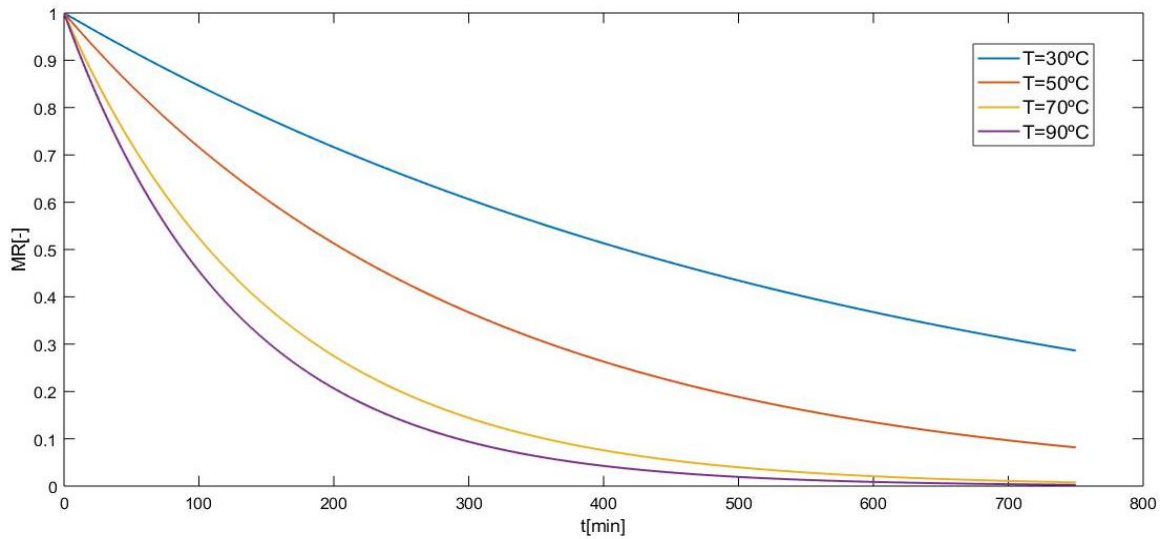


Fig.3.3 Porcentaje de humedad en función del tiempo según el Modelo de Page para las cuatro temperaturas constantes.

Se aprecia en la Fig.3.3 que la relación de humedad (MR) desciende a medida que pasa el tiempo hasta que llega al punto de estabilización, a partir del cual, como se ha explicado anteriormente, se considera que el producto no pierde más humedad. También se observa que cuanto mayor es la temperatura del aire que fluye por el secadero convectivo, más rápido pierde la humedad que poseen las microalgas.

3.1.2 Temperatura constante Modelo de Wang and Singh.

Otro de los modelos propuestos para predecir la cinética de secado en las microalgas es el Modelo de Wang and Singh elegido por su simplicidad y por los resultados que se obtuvieron a través de este modelo en el trabajo de Blanco-Cano y col. (2016) [9] aplicado a manzanas. Se comprueba si los datos de cinética de partida podrían ajustarse adecuadamente a dicho modelo, el cual sigue la siguiente ecuación cuadrática:

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (3.3)$$

Siendo:

- MR (*Moisture ratio*)
- a y b parámetros de la curva
- t , tiempo medido en minutos con un intervalo de 0,5 segundos

Según la ecuación (3.3), los parámetros libres son a y b tomando un valor diferente para cada temperatura, también, MR tomará distintos valores para cada instante de tiempo.

Para comprobar si este ajuste, empleando el Modelo de Wang and Singh a los datos de cinética de Viswanathan y col. (2012) [8], podría ser correcto, se realiza un ajuste

cuadrático a cada una de las cuatro ecuaciones de la relación de humedad del Modelo de Page para las cuatro temperaturas constantes, según se muestra en la Fig.3.4.

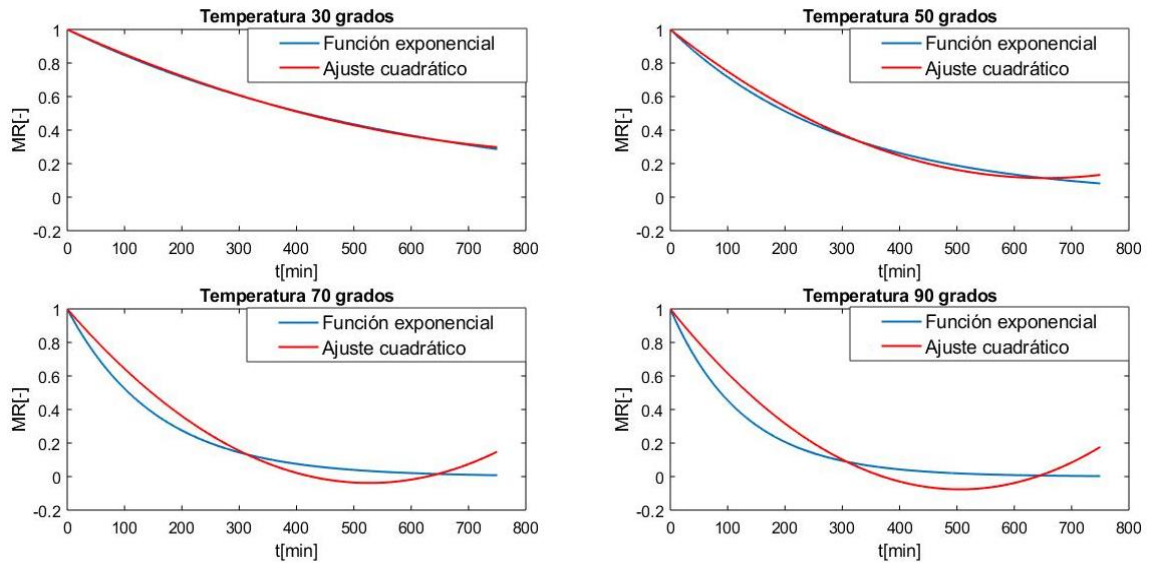


Fig.3.4 Comparación del Modelo de Page frente al Modelo de Wang and Singh para las cuatro temperaturas constantes.

Se observa en la Fig.3.4 que para las temperaturas de 30°C y de 50°C ambos modelos estudiados se asemejan considerablemente, mientras que para las otras dos temperaturas de 70°C y de 90°C se obtienen resultados de la evolución de la relación de humedad con el tiempo muy dispares para ambos modelos.

Las ecuaciones de la relación de humedad en función del tiempo para el Modelo de Wang and Singh y los R^2 del ajuste realizado, según se aprecia en la Fig.3.4, se muestran en la tabla 3.2.

TABLA 3.2 RESULTADOS MODELO DE WANG AND SINGH.

Temperatura	Ecuación ajuste cuadrático	R^2
T=30°C	$MR_{30} = 1 - 0.001553 \cdot t + 8.226 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$	0.9997
T=50°C	$MR_{50} = 1 - 0.002709 \cdot t + 2.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0.9922
T=70°C	$MR_{70} = 1 - 0.003942 \cdot t + 3.742 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0.9169
T=90°C	$MR_{90} = 1 - 0.00426 \cdot t + 4.216 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0.8447

Se aprecia también en la tabla 3.2 que, los resultados de R^2 obtenidos del ajuste son bajos para las temperaturas de 70°C y de 90°C, y muy aceptables para las temperaturas

de 30°C y 50°C, por lo que, para temperaturas comprendidas en un rango de hasta 50°C, el Modelo de Wang and Singh podría describir la cinética de secado en las microalgas a temperatura constante.

3.2.- Análisis de datos con temperaturas variables.

El objetivo principal de este trabajo es extrapolar la cinética de secado a temperatura constante a un secadero solar en el cual la temperatura e irradiación son variables de acuerdo con el ciclo solar, por lo que se realiza un estudio para determinar qué modelo podría ser el más eficiente para dichos parámetros variables.

3.2.1. Modelo de Wang and Singh.

Se ha determinado anteriormente que este modelo no es aceptable para temperaturas por encima de los 50 grados, no obstante, para este caso, como los parámetros variables de temperatura e irradiación se realizan según el ciclo solar, no se llegará a exceder dicha temperatura, por lo que el modelo podría seguir considerándose válido y, por tanto, es una opción para estudiar.

Este modelo sigue la ecuación (3.3) donde los parámetros libres a y b toman un determinado valor para cada temperatura. Con los cuatro valores de estos parámetros para las cuatro temperaturas constantes de 30°C, 50°C, 70°C y 90°C, obtenidos del ajuste realizado en el apartado anterior, tal y como se muestran en la tabla 3.2, se realiza un ajuste cuadrático de ambos parámetros libres, tal y como se muestra en la Fig.3.5.

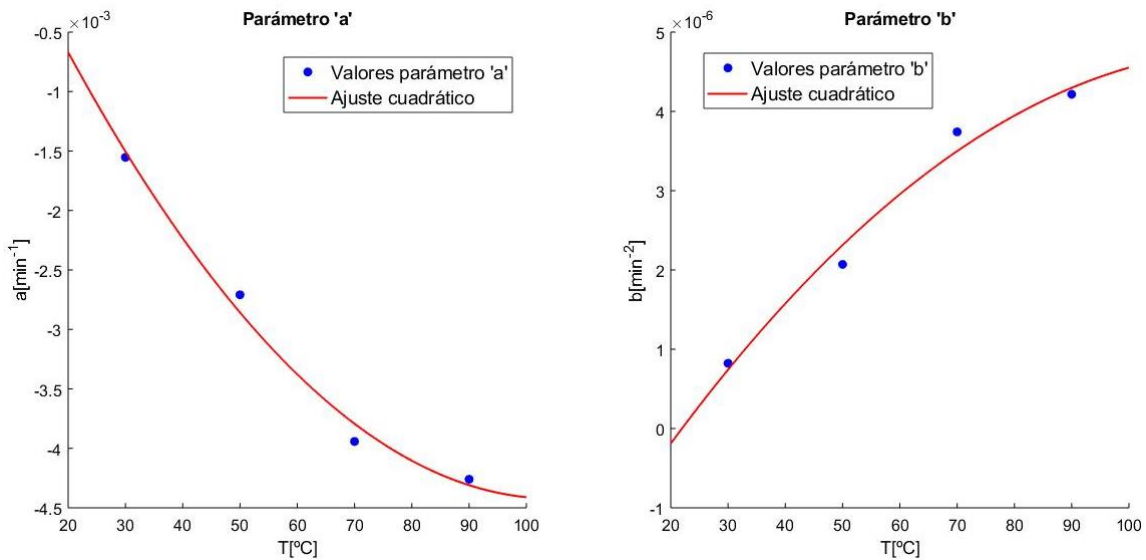


Fig.3.5 Ajuste cuadrático para los parámetros del Modelo de Wang and Singh.

Se observa en la Fig.3.5 que ambos parámetros a simple vista se ajustan a una ecuación cuadrática de forma correcta, el parámetro a se describe con una curva decreciente y el parámetro b con una creciente.

Los resultados de este ajuste cuadrático para ambos parámetros libres con sus respectivos R^2 se muestran en la tabla 3.3.

TABLA 3.3 PARÁMETROS MODELO DE WANG AND SINGH.

Parámetro	Ecuación ajuste cuadrático	R^2
a	$a(T) = 5.237 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0.0001096 \cdot T + 0.001314$	0.9893
b	$b(T) = -4.834 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 + 1.173 \cdot 10^{-7} \cdot T - 2.341 \cdot 10^{-6}$	0.9822

Se obtienen las ecuaciones para ambos parámetros en las que, para una determinada temperatura, se obtiene el valor de los parámetros, con unos resultados de R^2 aceptables. Esto tiene gran importancia, ya que permite determinar el parámetro a y b para cualquier temperatura posible que se obtenga durante el ciclo solar y, por tanto, el MR para cada instante que se dé esa temperatura.

3.2.2.- Modelo de Page.

En segundo lugar, se analiza el Modelo de Page que sigue la ecuación (3.2), en el que los parámetros libres son k y n tomando un valor determinado para cada temperatura se obtienen los valores de estos parámetros para las cuatro temperaturas de 30°C, 50°C, 70°C y 90°C, datos proporcionados por los resultados del trabajo de Viswanathan y col. (2012) [8]. La Fig.3.6 muestra el ajuste cuadrático realizado a ambos parámetros.

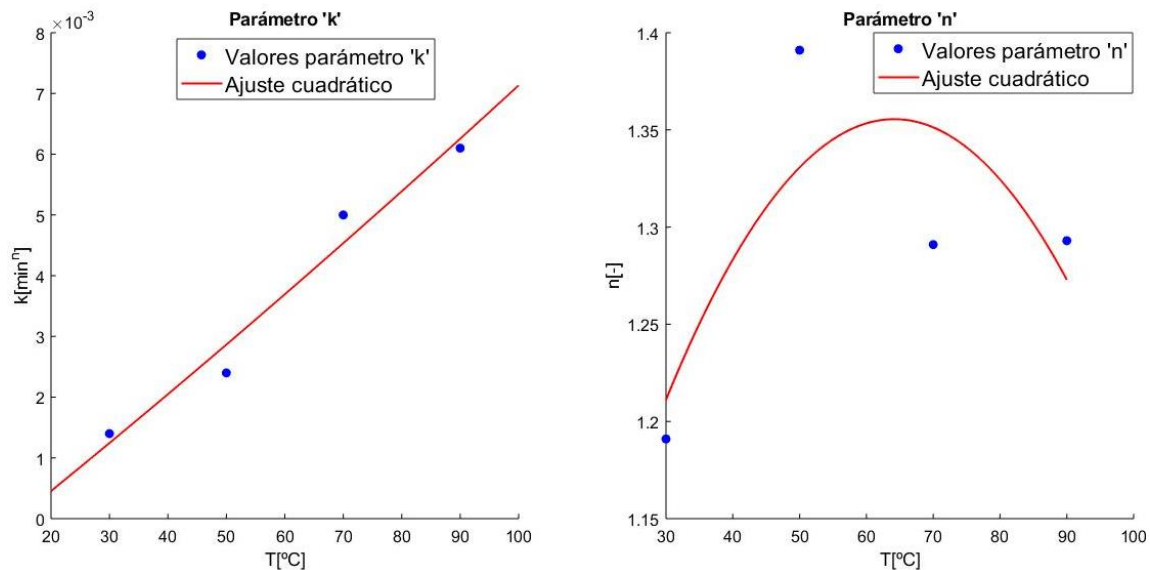


Fig.3. 6 Ajuste cuadrático para los parámetros del Modelo de Page.

Según se observa a simple vista en la Fig.3.6 el parámetro k se ajusta aproximadamente a una recta, mientras que, para el parámetro n el ajuste obtenido se aprecia que no describe dicho comportamiento.

De este ajuste se obtienen las ecuaciones cuadráticas y los resultados de R^2 que se muestran en la tabla 3.4.

TABLA 3.4 PARÁMETROS MODELO DE PAGE.

Parámetro	Ecuación ajuste cuadrático	R^2
k	$k(T) = 6.25 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 7.6 \cdot 10^{-5} \cdot T - 0.001091$	0.9667
n	$n(T) = -0.0001238 \cdot T^2 + 0.01588 \cdot T + 0.8461$	0.5961

Realizando una comparación de estos dos modelos analizados, se descarta el Modelo de Page ya que el R^2 del parámetro n es inaceptable, según se aprecia en la tabla 3.4 y, por tanto, los resultados proporcionados serán inexactos. No obstante, como este parámetro permanece prácticamente constante para todas las temperaturas (tal y como se puede observar en la Fig.3.6), se realiza un análisis para determinar la influencia que tiene dicho parámetro en cada una de las temperaturas a estudiar.

Para este nuevo caso de estudio se sigue la siguiente ecuación:

$$MR = \exp(-k \cdot t) \quad (3.4)$$

En este caso, el único parámetro libre es k , tomando un valor diferente para cada temperatura, también la relación de humedad (MR) tomará distintos valores para cada instante de tiempo.

En la Fig.3.7 se muestra la relación de humedad (MR) en función del tiempo, teniendo en cuenta la influencia del parámetro n y sin él. Se representa MR en ejes logarítmicos para observar con mayor claridad dicha influencia.

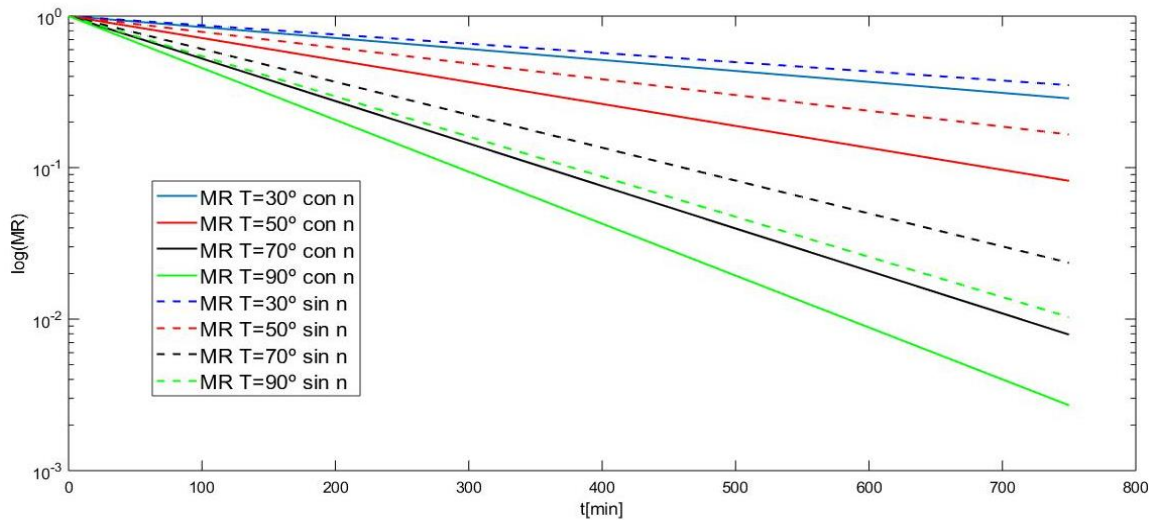


Fig.3.7 Ecuaciones del Modelo de Page linealizadas considerando la influencia del parámetro n y sin considerarlo.

Se observa en la Fig.3.7 que, a mayor temperatura, la diferencia entre las expresiones se hace más notable, sin embargo, para temperaturas bajas la influencia del parámetro n es menor. Para el caso de estudio de la cinética de secado en un secadero solar, como se encuentra en un rango de temperaturas bajas comprendidas en valores que no exceden los 50°C, se estudia si el Modelo de Page, sin considerar dicho parámetro siguiendo por tanto la ecuación (3.4), puede ser adecuado.

Se compara el ajuste del Modelo de Page siguiendo la ecuación (3.2), es decir, con la influencia del parámetro n , y sin dicho parámetro siguiendo la ecuación (3.4) para las temperaturas de 30°C y 50°C, tal y como se muestra en la Fig.3.8.

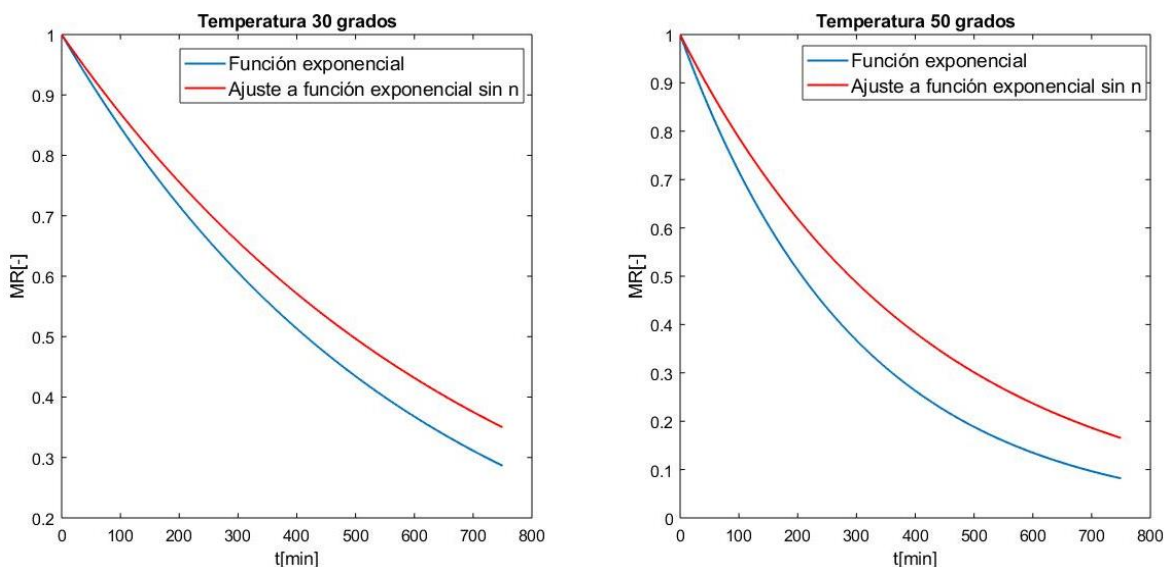


Fig.3.8 Ajuste del Modelo de Page considerando el parámetro n y sin considerarlo para las temperaturas de 30 y 50 grados.

Se aprecia en la Fig.3.8 que, a mayor temperatura, más notable se hace la diferencia de la curva, considerando dicho parámetro y sin hacerlo, tal y como se ha observado también en la Fig.3.7, además, siguiendo el Modelo de Page considerando el parámetro n se consigue mayor pendiente en la curva, perdiendo más humedad en el producto en menor tiempo.

Se obtienen los resultados de los ajustes realizados en la Fig.3.8 para ambas temperaturas en la tabla 3.5.

TABLA 3.5 RESULTADOS MODELO PAGE SIN PARÁMETRO N.

Temperatura	R^2
T=30°C	0.9228
T=50°C	0.8168

Según se ha determinado anteriormente que la diferencia entre ambas curvas se hacía más notable a medida que la temperatura aumentaba, se corrobora con los resultados obtenidos de R^2 en la tabla 3.5, consiguiendo valores mayores para la temperatura de 30°C y más bajos para 50°C.

Una vez comprobados los valores obtenidos de R^2 para los modelos de Wang and Singh y de Page sin el parámetro n (tablas 3.3 y 3.5 respectivamente), se observa que estos son mayores para el Modelo de Wang and Singh, por lo que, finalmente, este será el método elegido para el estudio de la cinética de secado para los parámetros de temperatura e irradiación variables, propios de los secaderos solares.

4.- RESULTADOS

4.1-Estudio de la extracción de vapor de agua de las microalgas en el secadero solar.

Una vez que se ha escogido el método en el que se basa el estudio, se calculará la variación de humedad en las microalgas con el tiempo, es decir, se estudiará la cinética de secado empleando las condiciones en las que se encuentra un secadero solar para el caso de siete ciudades distintas del mundo, variando así las condiciones de entrada al dispositivo y pudiendo determinar la influencia de estas condiciones en la cantidad de vapor de agua extraída del producto. Por otra parte, se estudiará la influencia que tiene la velocidad de flujo introducida en el colector, por lo que se realizarán dos estudios a dos velocidades constantes, a $U_1 = 0.56 \text{ m/s}$ y a $U_2 = 0.25 \text{ m/s}$.

Para poder determinar la cantidad de vapor de agua absorbido en las microalgas debida al paso de un flujo de aire, surge la necesidad de conocer la temperatura e irradiación a la que se encuentra el aire a la entrada del secadero solar. A consecuencia de dicha irradiación solar, surge una potencia solar térmica que calienta el fluido por el colector, por lo que también es indispensable conocer la temperatura a la salida de este, ya que el final del colector es la entrada de la cámara de secado donde se encuentran las microalgas a secar.

La Fig.4.1 muestra el esquema del secadero solar analizado donde el punto 1 se considera la entrada al colector y por lo tanto su temperatura serán los datos atmosféricos a los que se encuentre el dispositivo, y el punto 2 donde se considera el final del colector e inicio de la cámara de secado. Su temperatura se determinará en función de la irradiación que incida sobre el colector, parámetro que también dependerá de los datos meteorológicos a los que se encuentre el secadero solar. También se indican las dimensiones de dicho dispositivo obtenidos del trabajo de Blanco-Cano y col. [9]:

- Ancho del colector $W = 0.5 \text{ m}$
- Largo del colector $L = 1 \text{ m}$
- Distancia entre el plato absorbedor y la cubierta de vidrio $T = 0.045 \text{ m}$

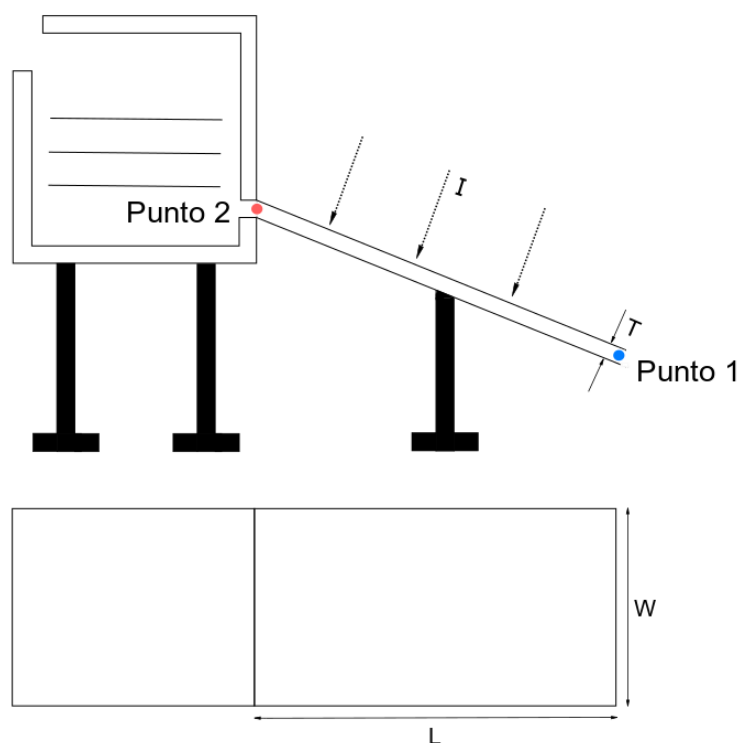


Fig.4.1 Esquema del secadero solar analizado.

Para comenzar con dicho estudio se obtienen los datos meteorológicos de entrada al secadero solar y por tanto los datos de temperatura del punto 1 y de la irradiación incidente en el colector tal y como se muestra en la Fig.4.1. Se obtienen a través de ENERGYPLUS [13], una plataforma que recoge estos datos para las distintas ciudades del mundo en cada mes del año. Se considera, por simplificación, que la irradiación está medida con un piranómetro sobre un plano horizontal y que, además, el origen de tiempo se marca con la salida del sol para cada caso.

En la Fig.4.2. se muestra el ciclo de temperatura e irradiación para el caso de Valencia, marcándose con líneas rojas verticales el inicio y el fin del origen de tiempos para dicho caso, es decir salida y puesta de sol aproximadamente.

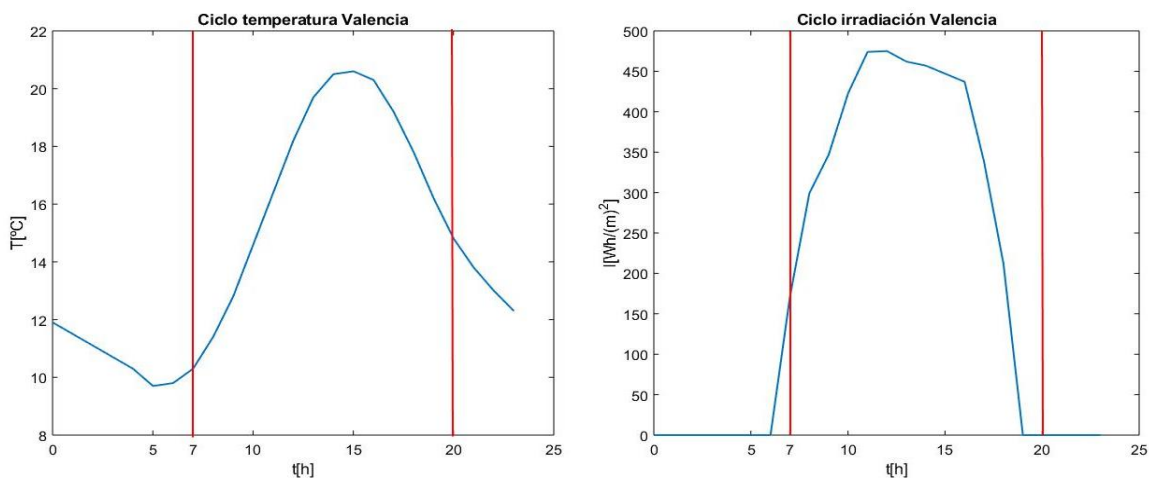


Fig.4.2 Ciclo de temperatura e irradiación para el caso de Valencia.

Según se aprecia en la Fig.4.2 se determina que la salida del sol para el caso de Valencia es a las 7 de la mañana y la puesta a las 20 de la tarde.

Los datos meteorológicos para las siete ciudades de estudio, con sus distintas condiciones a la entrada del secadero solar, se muestran en la tabla 4.1. Se elige el mes de abril para Valencia, agosto para Rio de Janeiro, junio para Moscú, enero para Sídney, julio para Múnich, junio para Tokio y mayo para Nueva York, para así tener una gran variedad en las condiciones de secado y poder estudiar su influencia.

TABLA 4.1 DATOS METEOROLÓGICOS DE TEMPERATURA E IRRADIACIÓN PROPORCIONADOS POR ENERGYPLUS [13].

Temperatura (°C) Irradiación (Wh/m ²)	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Horas del día (a.m.)							
4	-	-	-	21.7 4	-	-	13.6 4
5	-	-	13.6 32	22.2 100	13.9 11	16.7 20	14.1 86
6	-	-	14.7 125	23.0 307	15.3 124	17.9 53	14.9 187
7	10.3 171	21.1 37	15.8 234	24.0 441	17.0 243	19.1 99	16.4 255
8	11.4 299	21.6 240	16.9 290	25.2 485	18.3 356	20.3 137	17.4 304
9	12.8 347	22.2 361	17.5 339	26.2 473	19.3 319	21.0 171	18.3 357
10	14.6 423	22.8 448	18.2 359	27.2 441	20.1 388	21.7 216	19.5 369
11	16.4 474	23.4 507	18.8 349	27.6 426	20.8 397	22.3 215	20.1 381
12	18.3 475	24.0 529	19.0 333	27.7 442	22.0 445	22.5 199	20.8 360
13	19.7 462	24.3 539	19.3 303	27.2 474	22.3 485	22.3 252	21.0 359
14	20.5 457	24.6 503	19.9 255	26.8 488	22.7 405	22.0 200	21.2 343
15	20.6 447	24.9 447	19.7 249	26.0 444	22.1 351	21.6 144	21.0 303
16	20.3 437	24.6 387	19.5 226	25.3 311	21.9 311	20.7 96	20.1 242

17	19.2 338	24.3 236	19.3 157	24.5 102	21.3 192	19.9 38	19.2 191
18	17.8 212	24.0 24	18.5 94	24.0 4	20.5 72	19.1 0	18.1 52
19	16.2 0	-	17.7 16	-	18.9 0	-	17.3 1
20	14.8 0	-	-	-	-	-	-

Para el cálculo de la temperatura a la salida del colector del secadero solar y por lo tanto, a la entrada de la cámara de secado, es decir del punto 2 según se muestra en la Fig.4.1, se realiza un balance de energía entre la potencia térmica que está absorbiendo el fluido en el interior del colector según la ecuación (4.1) y la potencia térmica solar que incide en el colector según la ecuación (4.2).

$$Q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4.1)$$

$$Q = \eta IWL \quad (4.2)$$

Obteniendo mediante el balance de energía:

$$T_{out} = T_{in} + \frac{WL\eta}{\dot{m}c_{p,aire}} \quad (4.3)$$

Para el cálculo del gasto másico que fluye por el colector a una velocidad constante inducido mediante un ventilador se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \rho \cdot W \cdot T \cdot U \quad (4.4)$$

Siendo:

- $\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$ la densidad del aire
- U , la velocidad de flujo del aire en metros por segundo
- $c_{p,aire} = 1 \frac{kJ}{kg}$ el calor específico del aire en condiciones de temperatura y presión ambiente

Según los datos del secadero solar proporcionados por el trabajo de Blanco-Cano y col. [9] y según se puede apreciar en la Fig.4.1, obtenemos:

- Distancia entre el plato absorbedor y la cubierta de vidrio $T = 0.045 \text{ m}$
- Ancho del colector $W = 0.5 \text{ m}$
- Largo del colector $L = 1 \text{ m}$
- Rendimiento del colector $\eta = 0.65$
-

Para estudiar la influencia que tiene la velocidad en la determinación de la cantidad de vapor extraída se calcula dicha relación de humedad (MR) frente al tiempo para dos velocidades de aire distintas, variando así el gasto másico de entrada al colector.

4.1.1.- Cálculo de la cantidad de vapor de agua extraída en el secadero solar para la velocidad de $U_1 = 0.56 \text{ m/s}$.

Para la primera velocidad aplicando la ecuación (4.4) se obtiene un flujo másico de:

$$\dot{m}_1 = \rho \cdot W \cdot T \cdot U_1 = 0.015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

A continuación, aplicando la ecuación (4.3) se calcula la temperatura a la salida del colector para cada instante, se realiza un ajuste cuadrático a dichos resultados obteniendo la ecuación de la temperatura a la salida del colector en función del tiempo para cada ciudad tal y como se puede observar en la Fig.4.3.

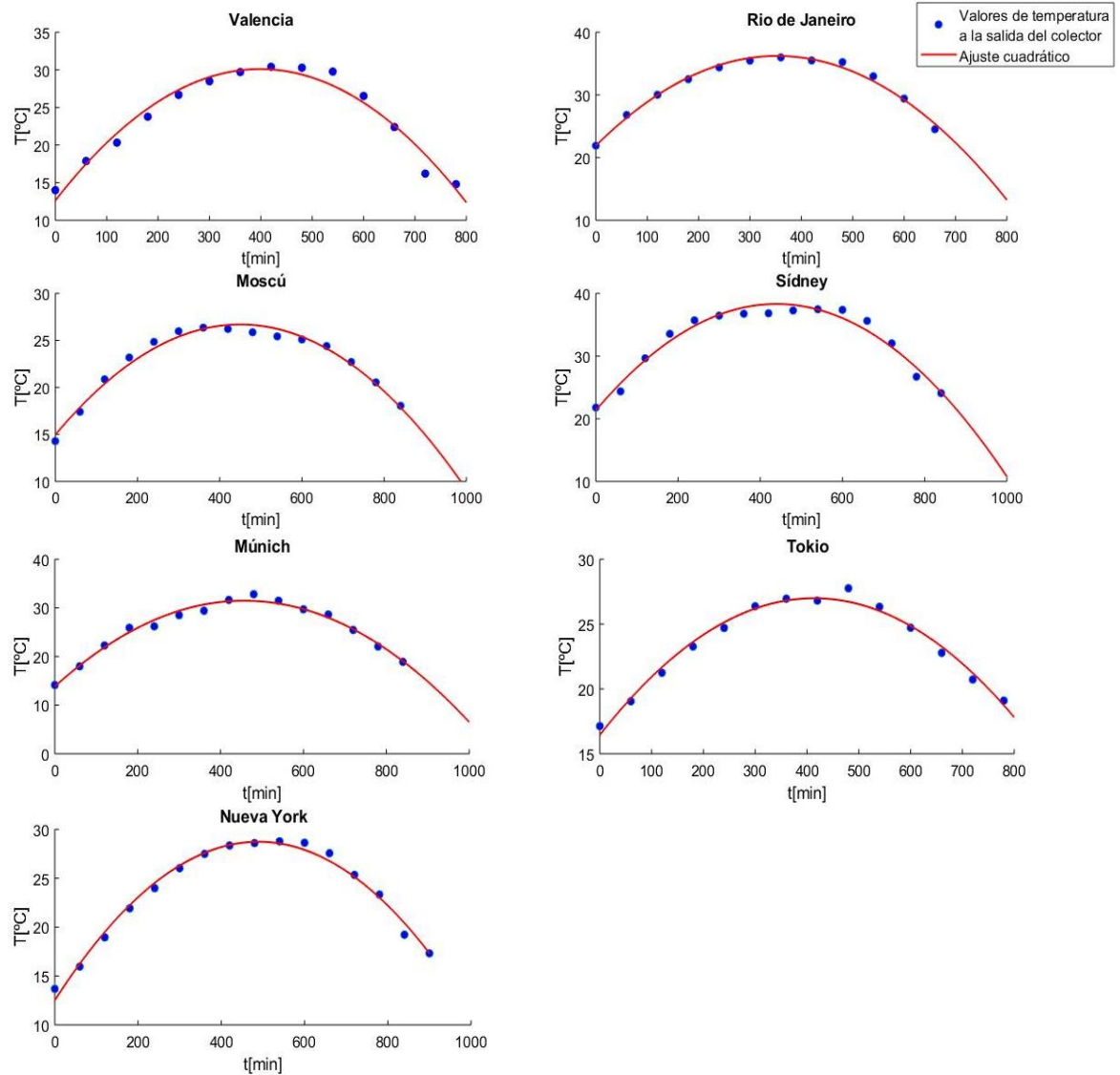


Fig.4.3 Ajuste cuadrático para los valores de temperatura de salida en cada ciudad para una velocidad de flujo de U_1 .

Las ecuaciones que definen la temperatura a la salida del colector en función del tiempo para las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_1 junto con los R^2 del ajuste mostrado en la Fig.4.3, se muestran en la tabla 4.2.

TABLA 4.2 RESULTADOS TEMPERATURA A LA SALIDA DEL COLECTOR EN LAS DISTINTAS CIUDADES PARA U1.

Ciudad	Ecuación ajuste cuadrático	R ²
Valencia	$T_{out_{valencia}}(t) = -0.00011 \cdot t^2 + 0.0877 \cdot t + 12.63$	0.9628
Rio de Janeiro	$T_{out_{Rio de Janeiro}}(t) = -0.000115 \cdot t^2 + 0.08115 \cdot t + 21.9$	0.9884
Moscú	$T_{out_{Moscú}}(t) = -5.797 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0.05216 \cdot t + 14.96$	0.9798
Sídney	$T_{out_{Sídney}}(t) = -8.77 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0.07714 \cdot t + 21.35$	0.9664
Múnich	$T_{out_{Múnich}}(t) = -8.463 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0.07731 \cdot t + 13.82$	0.9806
Tokio	$T_{out_{Tokio}}(t) = -6.159 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0.05097 \cdot t + 16.45$	0.9809
Nueva York	$T_{out_{Nueva York}}(t) = -6.767 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0.06625 \cdot t + 12.52$	0.9868

Una vez obtenida la expresión que determina la temperatura a la salida del colector en función del tiempo, se está en disposición de calcular la pérdida vapor de agua frente al tiempo para la temperatura variable.

Se parte de la idea de que, aunque la temperatura a la salida del colector es variable frente al tiempo, para intervalos de tiempo suficientemente pequeños (10 ms) la variación ΔMR es constante, ya que en dicho intervalo la temperatura es constante y, por lo tanto, se puede aplicar el Modelo de Wang and Singh que sigue la ecuación (3.3) en dicho intervalo. También se considera que MR toma el valor 1 para el instante inicial. A raíz de estas hipótesis se puede determinar MR en el instante siguiente siguiendo la ecuación (4.5).

$$MR(t + dt) = MR(t) - \Delta MR_2 \quad (4.5)$$

Siendo:

$$t = n \cdot dt \quad (4.6)$$

- n , el número de intervalos.
- $dt = 10\text{ms}$.

$$\Delta MR_1 = 1 + a \cdot dt + b \cdot dt^2 \quad (4.7)$$

Considerando a y b los ajustes cuadráticos anteriormente realizados mostrados en la tabla 3.3 y que dependen de la temperatura que corresponda en cada intervalo de tiempo tal y como se muestra en las ecuaciones (4.8) y (4.9).

$$a(T) = 5.237 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0.0001096 \cdot T + 0.001314 \quad (4.8)$$

$$b(T) = -4.834 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 + 1.173 \cdot 10^{-7} \cdot T - 2.341 \cdot 10^{-6} \quad (4.9)$$

Finalmente se obtiene la variación de la relación de humedad en cada instante del tiempo siguiendo la ecuación:

$$\Delta MR_2 = 1 - \Delta MR_1 \quad (4.10)$$

Y una vez determinado ΔMR_2 se obtiene MR frente al tiempo con la ecuación presentada anteriormente en la ecuación (4.5).

A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo de MR frente al tiempo para el caso de la ciudad de Valencia. Se realiza para un intervalo de $t = 600$ minutos desde la salida del sol, es decir, considerando el proceso de secado hasta las 17:00. El valor de la temperatura a la salida del colector es $T_{out_valencia} = 25.65$ °C siguiendo la ecuación que se muestra en la tabla 4.2. Con este valor de temperatura se calculan los parámetros libres a y b según las ecuaciones (4.8) y (4.9) respectivamente, obteniendo $a = -1.15 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ y $b = 3.50 \cdot 10^{-7} \text{ min}^{-2}$. Para un intervalo de tiempo un $dt = 10$ ms pasado a minutos $dt = 0.00016$ min, se aplica la ecuación (4.7) obteniendo $\Delta MR_1 = 0.9999$, aplicando (4.10) se obtiene $\Delta MR_2 = 1.84 \cdot 10^{-7}$ que restando este valor al MR calculado en el intervalo anterior de tiempo, en la ecuación (4.5) se calcula $MR(t+dt)$. Este proceso se repite hasta $t = 600.00016$ min.

En la Fig.4.4 se representa la variación de MR frente al tiempo para las diferentes ciudades siguiendo la metodología de cálculo anteriormente descrito.

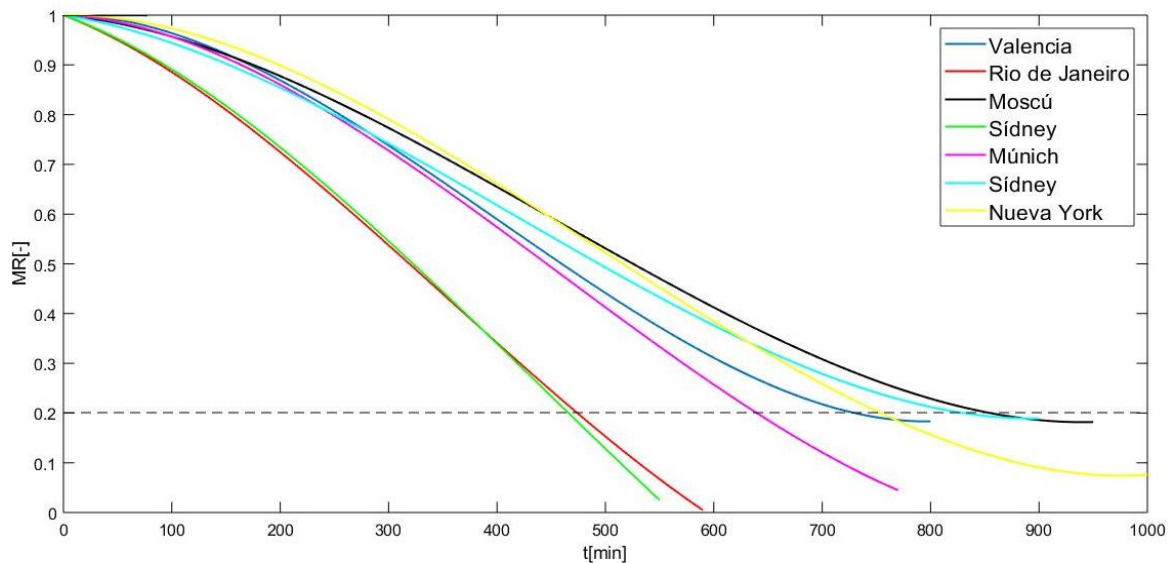


Fig.4.4 Evolución del porcentaje de humedad con respecto el tiempo en función del ciclo solar para cada ciudad para una velocidad de flujo de U_1 .

Se calculan los tiempos que se tarda en llegar a un porcentaje de humedad del 20%, ya que los productos no suelen ser secados por encima de este valor debido a que podrían perder ciertas propiedades, además, el gasto de energía que supondría secar más el producto sería muy alto debido a que MR comienza a estabilizarse, tal y como se aprecia en la Fig.4.4 y, por lo tanto, se emplearía mucho tiempo en el proceso de secado en relación con la humedad que se perdería. Se muestran los tiempos de dicho porcentaje de humedad en cada ciudad para la velocidad de flujo U_1 en la tabla 4.3.

TABLA 4.3 TIEMPO QUE TARDA EN LLEGAR AL 20% HUMEDAD PARA U_1 EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Tiempo en llegar a MR=0.2 (min)	730.10	474.08	855.05	465.95	639.68	830.39	753.82

Analizando los resultados obtenidos tanto en la Fig.4.4, como en la tabla 4.3 se observa que, para llegar al mismo porcentaje de humedad relativa en el caso de Sídney y Rio de Janeiro, se tarda considerablemente menos tiempo que en el resto de ciudades. Moscú, junto con Tokio, por el contrario, son las ciudades en las que conllevaría una duración más larga para secar nuestro producto, esto puede deberse a que sus temperaturas de salida son más bajas que en el caso de las ciudades en las que la cinética de secado es más rápida, tal y como se muestra en la Fig.4.3, esto puede deberse a dicho factor, pero no es concluyente.

4.1.2.- Cálculo de la cantidad de vapor de agua extraída en el secadero solar para la velocidad de $U_2 = 0.25 \text{ m/s}$.

Para el segundo caso de velocidad constante aplicando la ecuación (4.4) se obtiene el gasto másico.

$$\dot{m}_2 = \rho \cdot W \cdot T \cdot U_2 = 0.00675 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Análogamente al caso anterior, se aplica la ecuación (4.3) para el cálculo de la temperatura a la salida del colector para cada instante, se realiza un ajuste cuadrático de los resultados obteniendo la ecuación de la temperatura a la salida del colector en función del tiempo para cada ciudad tal y como se muestra en la Fig.4.5.

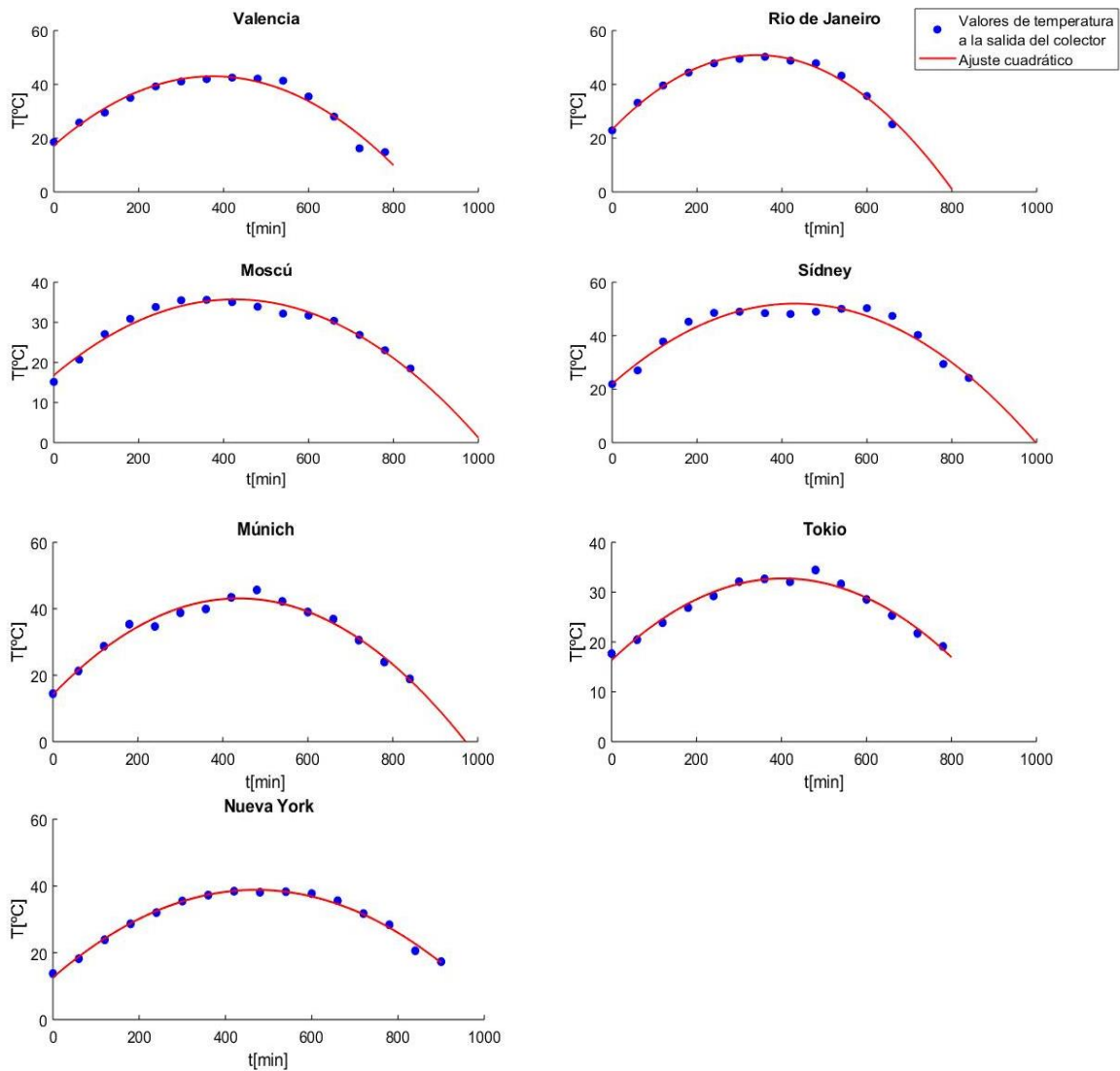


Fig.4.5 Ajuste cuadrático para los valores de temperatura de salida en cada ciudad para una velocidad de flujo de U_2 .

Las ecuaciones que definen la temperatura a la salida del colector en función del tiempo para las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_2 junto con los R^2 del ajuste que se observa en la Fig.4.5, se muestran en la tabla 4.4.

TABLA 4.4 RESULTADOS TEMPERATURA A LA SALIDA DEL COLECTOR EN LAS DISTINTAS CIUDADES PARA U_2 .

Ciudad	Ecuación ajuste cuadrático	R^2
Valencia	$T_{out_{Valencia\ nueva}}(t) = -0.000183 \cdot t^2 + 0.1373 \cdot t + 17.26$	0.9611
Rio de Janeiro	$T_{out_{Rio\ de\ Janeiro\ nueva}}(t) = -0.0002369 \cdot t^2 + 0.1619 \cdot t + 23.23$	0.9888
Moscú	$T_{out_{Moscú\ nueva}}(t) = -0.0001045 \cdot t^2 + 0.08896 \cdot t + 16.79$	0.9655
Sídney	$T_{out_{Sídney\ nueva}}(t) = -0.0001618 \cdot t^2 + 0.1395 \cdot t + 21.95$	0.9387
Múnich	$T_{out_{Múnich\ nueva}}(t) = -0.0001511 \cdot t^2 + 0.1322 \cdot t + 14.2$	0.9748
Tokio	$T_{out_{Tokio\ nueva}}(t) = -0.0001006 \cdot t^2 + 0.08123 \cdot t + 16.34$	0.9695
Nueva York	$T_{out_{Nueva\ York\ nueva}}(t) = -0.0001184 \cdot t^2 + 0.1114 \cdot t + 12.61$	0.9909

Se calcula la pérdida de vapor de agua frente al tiempo para temperaturas variables utilizando las ecuaciones (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10). Se muestra en la Fig.4.6 la variación de MR frente al tiempo para un flujo de aire a una velocidad U_2 en las diferentes ciudades.

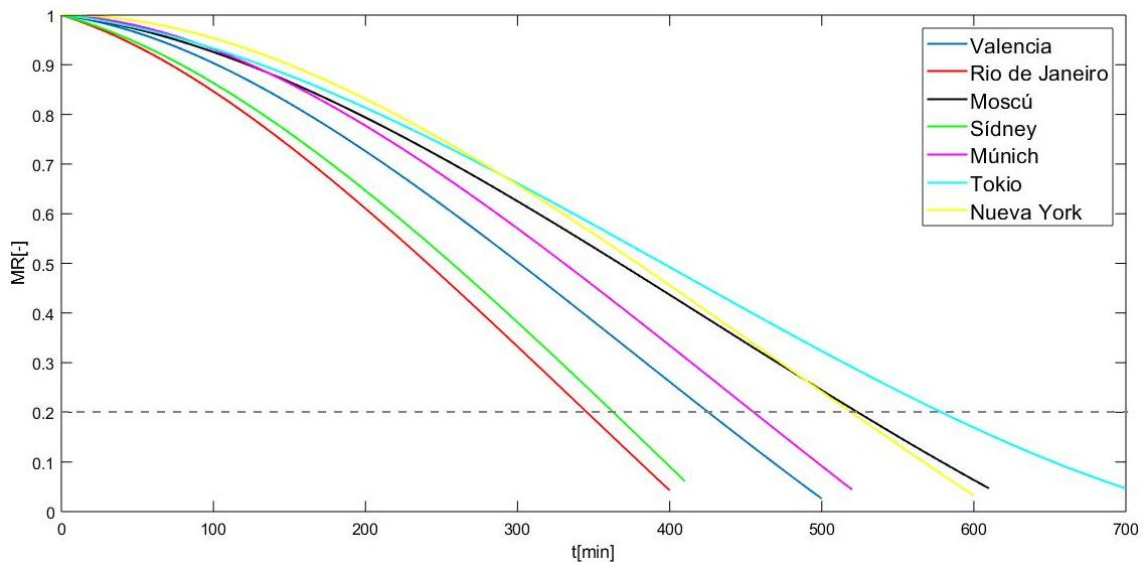


Fig.4.6 Evolución del porcentaje de humedad con respecto el tiempo en función del ciclo solar para cada ciudad para una velocidad de flujo de U_2 .

Se calculan los tiempos que se tardaría en llegar a una humedad del 20% para una velocidad de flujo U_2 para las distintas ciudades mostrándolos en la tabla 4.5.

TABLA 4.5 TIEMPO EN LLEGAR AL 20% HUMEDAD PARA U2 EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Tiempo en llegar a MR=0.2 (min)	425.46	345.59	523.70	362.95	455.32	578.76	519.51

Se vuelve a observar, tanto en la Fig.4.6 como en la tabla 4.5, que las ciudades en las que se tiene una cinética de secado más lenta son Tokio y Moscú, se comprueba en la Fig.4.5 que vuelven a ser las que tienen el perfil más bajo de temperatura a la salida del colector.

Se recopilan los datos obtenidos, tanto de la tabla 4.5 como de la tabla 4.3, en la tabla 4.6 para poder realizar una mejor comparación.

TABLA 4.6 TIEMPO EN LLEGAR A UN 20% DE HUMEDAD PARA AMBAS VELOCIDADES DE FLUJO EN LAS DISTINTAS CIUDADES

Tiempo en llegar a MR=0.2 (min)	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Para una velocidad de flujo $U_1 = 0.56$ m/s.	730.10	474.08	855.05	465.95	639.68	830.39	753.82
Para una velocidad de flujo $U_2 = 0.25$ m/s.	425.46	345.59	523.70	362.95	455.32	578.76	519.51

Manteniendo todos los factores constantes y variando sólo la velocidad de flujo, se aprecia que, comparando la Fig.4.4 y la Fig.4.6 y observando los resultados de la tabla 4.6, a menor velocidad de flujo de aire introducido en el colector, se tarda menos tiempo en llegar al porcentaje de humedad deseado en las microalgas. Esto es debido a que, menor velocidad de flujo implica menor gasto másico, como se puede comprobar en la ecuación (4.4) y, por tanto, mayor será la temperatura a la salida del colector según la ecuación (4.3) por lo que tendrá una cinética de secado más rápida.

Según los resultados obtenidos, la temperatura a la salida del colector puede ser un factor relevante en el estudio de la cinética de secado, pero puede depender de otras condiciones meteorológicas en las que se encuentre el secadero solar, por lo que se cotejará estas condiciones a través de un estudio de la psicrometría.

4.2.- Estudio de la capacidad máxima de secado de las microalgas.

En el estudio de la capacidad máxima de secado de las microalgas, se hace uso de la psicrometría, rama de la ciencia dedicada al estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo, es decir, compuesto por aire seco y vapor de agua y, al efecto de la humedad atmosférica en los materiales, según [14] y [15]. El conocimiento y comportamiento de tales sistemas húmedos es esencial para el análisis y diseño de dispositivos de aire acondicionado, torres de refrigeración y procesos industriales que exijan un fuerte control del contenido en vapor de agua del aire, según [16]. Esta ciencia es utilizada para el cálculo de la capacidad máxima de secado debido a que en el secadero solar se encuentra un sistema de aire húmedo. El cálculo de todos los parámetros psicrométricos, pueden hallarse haciendo uso de las ecuaciones que propiamente los describen, o bien, con el diagrama psicrométrico, un método gráfico que relaciona todos los parámetros psicrométricos y que únicamente con dos valores de dos parámetros conocidos se obtienen los restantes.

Se definen los principales parámetros psicrométricos de los que se harán uso en el estudio: la temperatura de bulbo húmedo, es aquella que se mide en un termómetro de bulbo húmedo, es decir, un termómetro ordinario de líquido en vidrio cuyo bulbo está rodeado por una muselina humedecida con agua; la temperatura de bulbo seco, es la temperatura medida por un termómetro común colocado en la mezcla; la humedad relativa (ϕ), definida como el cociente de la fracción molar del vapor de agua en una muestra de aire húmedo determinada y la fracción molar en una muestra de aire húmedo saturado a la misma temperatura y presión de la mezcla; la entalpía de la mezcla, que se obtiene sumando la contribución de cada componente en las condiciones en que existe en la mezcla y, por último, la relación de humedades (ω), definida como el cociente entre las masas de vapor de agua y de aire seco, según [16].

En este estudio se describirán tres puntos de los cuales obtendremos sus parámetros psicrométricos, para, más tarde, obtener la capacidad máxima de secado. El primer punto, a la entrada del colector, el segundo, a la salida del mismo y a la entrada de la cámara de secado y, el tercero, a la salida de la cámara de secado. En la Fig.4.7 se muestra la posición de los puntos descritos.

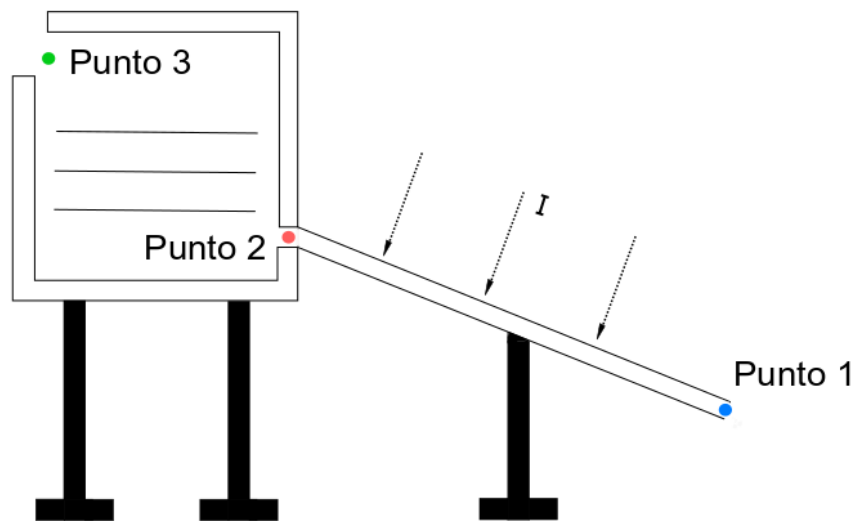


Fig.4.7 Esquema del secadero solar situando los puntos a estudiar.

Para el cálculo de todos los parámetros psicrométricos, se ha seguido el siguiente razonamiento. Inicialmente, a la entrada del secadero (punto 1) se consideran las condiciones de temperatura del bulbo seco y humedad relativa ambiental proporcionadas por los datos meteorológicos de la tabla 4.1 en las distintas ciudades. A continuación, a la salida del colector (punto 2), gracias a la ecuación (4.3), se obtiene la temperatura del bulbo seco de dicho punto, además, no se produce ningún intercambio de masa, permaneciendo la relación de humedades del punto 1 y 2 constante. Para el cálculo de la relación de humedades en la cámara de secado (punto 3), se supone el caso extremo en el cual el aire satura, siendo incapaz de absorber más agua, para ello, se considera que se encuentra ante un saturador adiabático, un dispositivo que opera en estado estacionario y sin intercambio de calor apreciable en su entorno. El punto 3 se encuentra a la temperatura del bulbo húmedo del punto 2 y a igual entalpía del mismo. A medida que la mezcla avanza por el dispositivo, entra en contacto con la superficie de las microalgas, parte del agua se evaporará hasta alcanzar la saturación. La energía necesaria para esta evaporación procede del aire húmedo, que reduce la temperatura al ir atravesando el conducto, según [16].

Finalmente, la capacidad máxima de secado será la diferencia entre la relación de humedades inicial (punto 1) y final (punto 3). Para la obtención de esta propiedad se requieren los datos de humedad relativa de entrada mostrándose en la tabla 4.7 para las distintas ciudades, un día tipo, mediante los datos de ENERGYPLUS [13].

TABLA 4.7 DATOS METEOROLÓGICOS DE HUMEDAD RELATIVA PROPORCIONADOS POR ENERGYPLUS [13].

	Valencia	Río de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Horas del día (a.m.)	Humedad relativa(%)						
4	-	-	-	79	-	-	80
5	-	-	81	77	87	99	79
6	-	-	76	73	84	96	76
7	77	86	71	69	75	90	71
8	72	85	67	63	69	84	68
9	66	80	64	58	62	81	67
10	59	77	62	54	59	78	64
11	53	75	60	53	56	76	62
12	47	73	60	53	52	74	61
13	43	72	60	56	50	74	61
14	42	70	57	57	49	75	60
15	41	71	58	61	52	77	60
16	42	73	59	64	52	81	63
17	45	74	60	68	54	84	66
18	49	77	63	71	59	88	68
19	54	-	67	-	65	-	70
20	59	-	-	-	-	-	-

En primer lugar, se realizan los cálculos para la obtención de la capacidad máxima de secado media en un día tipo considerando la media de las temperaturas y humedades en dicho día para las distintas ciudades y, a continuación, se realizan los cálculos para obtener la capacidad máxima de secado, en función del tiempo en cada ciudad, para cada día tipo con el uso de las temperaturas y humedades en cada instante de tiempo. Además, para ambos casos se realizará un estudio de la influencia de la velocidad de flujo de aire en el cálculo de esta propiedad.

4.2.1.- Cálculo capacidad máxima de secado media.

Como se ha explicado anteriormente, se utiliza el diagrama psicrométrico para el cálculo de la capacidad máxima de secado. Para cada ciudad se sitúan los puntos 1, 2 y 3 en dicho diagrama, obteniendo finalmente dicha propiedad siendo esta la diferencia entre la relación de humedades inicial y final. Los datos necesarios para el cálculo son la humedad relativa a la entrada del colector, punto 1, la temperatura de entrada y de salida del colector siendo la temperatura del bulbo seco del punto 1 y 2 respectivamente. Los

datos a la entrada son constantes para ambas velocidades de flujo, el parámetro que varía es la temperatura a la salida del colector, punto 2.

Se calcula la humedad relativa media en cada ciudad, mostrándose en la Fig.4.8.

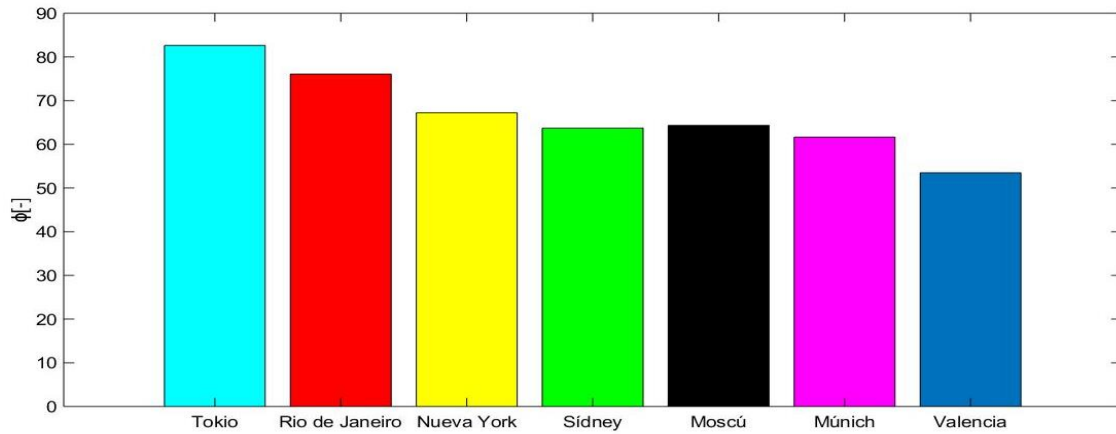


Fig.4.8 Humedades medias en las distintas ciudades.

Además, se calcula la temperatura media a la entrada del colector para las distintas ciudades, mostrándose en la siguiente gráfica Fig.4.9.

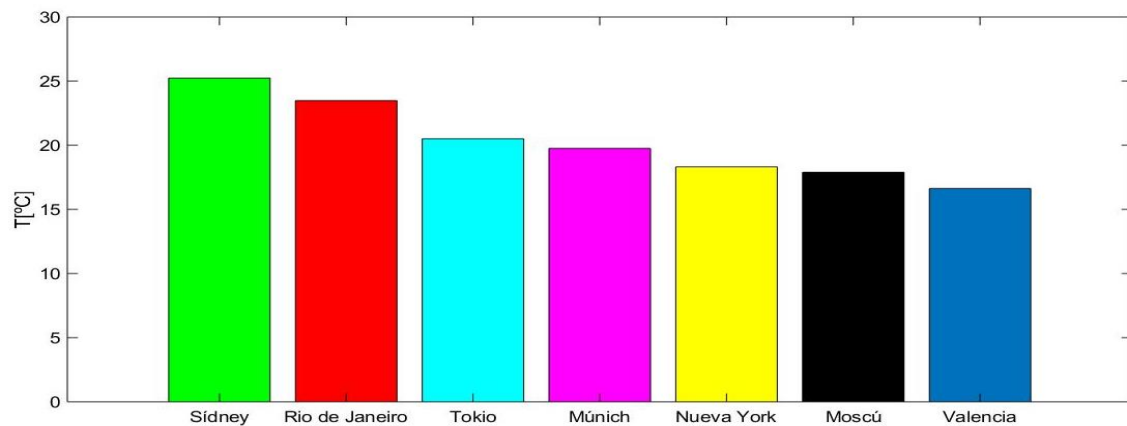


Fig.4.9 Temperaturas medias a la entrada del colector (punto 1) en las distintas ciudades.

4.2.1.1.- Cálculo de la capacidad máxima de secado media para la velocidad de $U_1 = 0.56 \text{ m/s}$.

Para la primera velocidad se calcula la temperatura a la salida del colector para las distintas ciudades, haciendo uso de la ecuación (4.3), se realiza la media de las temperaturas obtenidas, representando dichos resultados en la Fig.4.10.

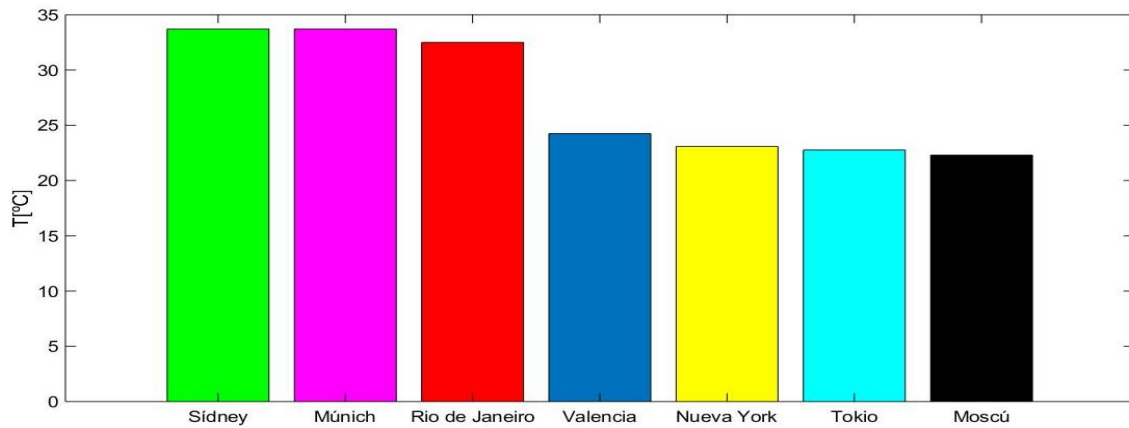


Fig.4.10 Temperaturas medias a la salida del colector (punto 2) en las distintas ciudades para la velocidad de flujo U_1 .

Se muestra el ejemplo del cálculo de la capacidad máxima de secado media mediante el diagrama psicrométrico para el caso de Valencia, situando los tres puntos descritos anteriormente. Se sigue la metodología explicada anteriormente, en la cual se comienza con unos datos de partida, la temperatura del bulbo seco de la humedad relativa para el punto 1, más tarde, con la temperatura a la salida del colector, es decir, del punto dos y, manteniendo la relación de humedad constantes, ya que no se produce pérdida de masa, se sitúa el punto 2 y por último, llegando al estado de saturación y manteniéndose la entalpía constante, se sitúa el último punto, este ejemplo se muestra en la Fig.4.11.

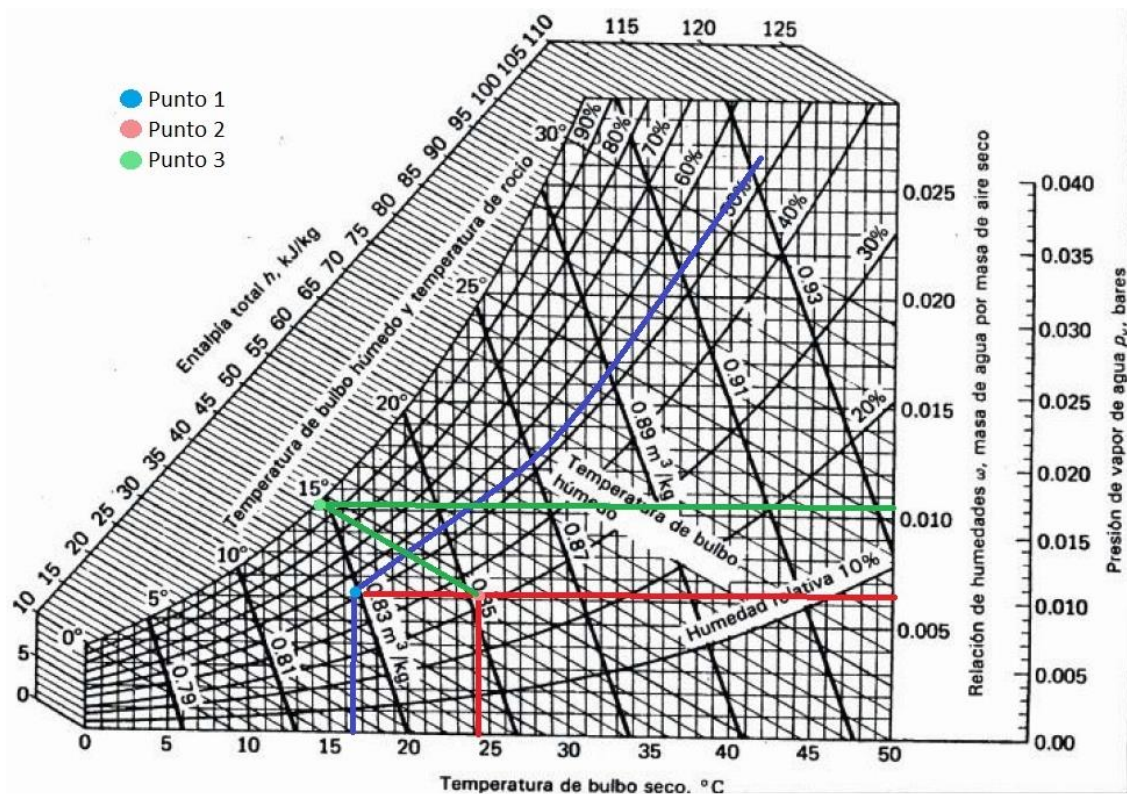


Fig.4.11 Diagrama psicrométrico posicionando los puntos 1, 2 y 3 en el caso de Valencia.

Los datos de partida analíticos y, el resultado que se saca a partir de cada punto para el cálculo de la capacidad máxima de secado para el mismo ejemplo de Valencia, que se observan en la Fig.4.11, se muestran a continuación.

Ejemplo Valencia.

Punto 1:

$$\left. \begin{array}{l} T_{bulboseco1} = 16,63 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \phi_1 = 53,50\% \end{array} \right\} \quad - \omega_1 = 0,0063 \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a}$$

Punto 2:

$$\left. \begin{array}{l} T_{bulboseco2} = 24,24 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \omega_1 = \omega_2 \end{array} \right\} \quad - h_2 = 40,44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Punto 3:

$$\left. \begin{array}{l} h_3 = h_2 \\ \phi_3 = 100\% \end{array} \right\} \quad - \omega_3 = 0,0103 \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a}$$

Por tanto, la capacidad de secado máxima en Valencia es: $\omega_3 - \omega_1 = 0,0040 \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a}$

Siguiendo esta misma metodología para cada ciudad se calcula la capacidad máxima de secado para una velocidad de flujo de aire de U_1 en cada una de las distintas ciudades mostrándose los resultados en la tabla 4.8.

TABLA 4.8 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE SECADO MEDIA PARA VELOCIDAD DE FLUJO U_1 EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
<u>Datos de partida</u>							
$T_{bulboseco1}[^{\circ}C]$	16.63	23.48	17.89	25.24	19.75	20.51	18.31
$\phi_1[\%]$	53.5	76.08	64.33	63.73	61.67	82.64	67.25
$T_{bulboseco2}[^{\circ}C]$	24.24	32.5	22.30	33.72	33.72	22.76	23.09
$\phi_3[\%]$	100						
<u>Resultados</u>							
$\omega_1 = \omega_2 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$	0.0063	0.0139	0.0082	0.0129	0.0089	0.0125	0.0089
$h_2 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	40.44	68.23	43.37	66.98	56.69	54.79	45.79
$\omega_3 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$	0.0103	0.0178	0.0110	0.0174	0.0145	0.0140	0.0116
Capacidad máxima de secado media:	0.0040	0.0039	0.0028	0.0045	0.0056	0.0015	0.0028
$\omega_3 - \omega_1 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$							

Para conocer el gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero solar, se calcula el gasto másico de aire seco que circula por el colector mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}}{1 + \omega_1} \quad (4.11)$$

A continuación, con gasto másico de aire seco obtenido con la ecuación (4.11) y la capacidad máxima de secado media obtenida para cada ciudad en la tabla 4.8 se obtiene el gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero solar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a \cdot \Delta\omega \quad (4.12)$$

Se obtiene el gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero para las distintas ciudades tal y como se muestra en la tabla 4.9.

TABLA 4.9 GASTO MÁSIICO DE VAPOR DE AGUA ABSORBIDO EN EL SECADERO PARA VELOCIDAD DE FLUJO U1 EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Gasto másico de vapor de agua $\left[\frac{kg_v}{s}\right]$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.74 \cdot 10^{-5}$	$4.12 \cdot 10^{-5}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$	$8.39 \cdot 10^{-5}$	$2.16 \cdot 10^{-5}$	$4.10 \cdot 10^{-5}$

Los resultados de los gastos másicos de vapor de agua absorbido en el secadero para las distintas ciudades se muestran en la Fig.4.12.

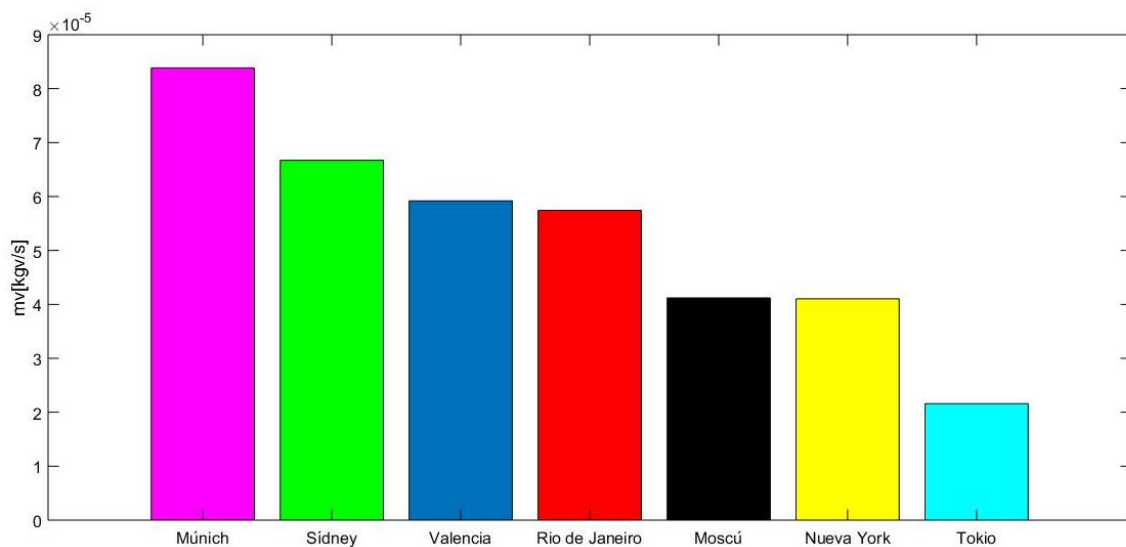


Fig.4.12 Gastos másicos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U1.

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 4.8, en la tabla 4.9 y en la Fig.4.12, se observa cómo, para el caso de Rio su temperatura a la salida del colector es de 32.5°C mientras que la de Valencia es de 24.24°C y, aun así la capacidad máxima de secado es mayor en Valencia que en Rio, esto se debe a que la humedad relativa en Rio de Janeiro es de 76.08% y en Valencia 53.5%. Tokio no es la ciudad con menor temperatura a la salida de su colector y, aun así, es la de menor capacidad máxima de secado y, por lo tanto, la que posee menor gasto másico de vapor de agua absorbido, esto se debe a que es la que mayor humedad relativa tiene.

4.2.1.2.- Cálculo de la capacidad máxima de secado media para la velocidad de $U_2 = 0.25 \text{ m/s}$.

Para la segunda velocidad de flujo del aire que se introduce por el colector, se obtiene la temperatura a la salida del colector haciendo uso de la ecuación (4.3) y realizando la media móvil simple para las distintas ciudades se obtiene los resultados representados en la Fig.4.13.

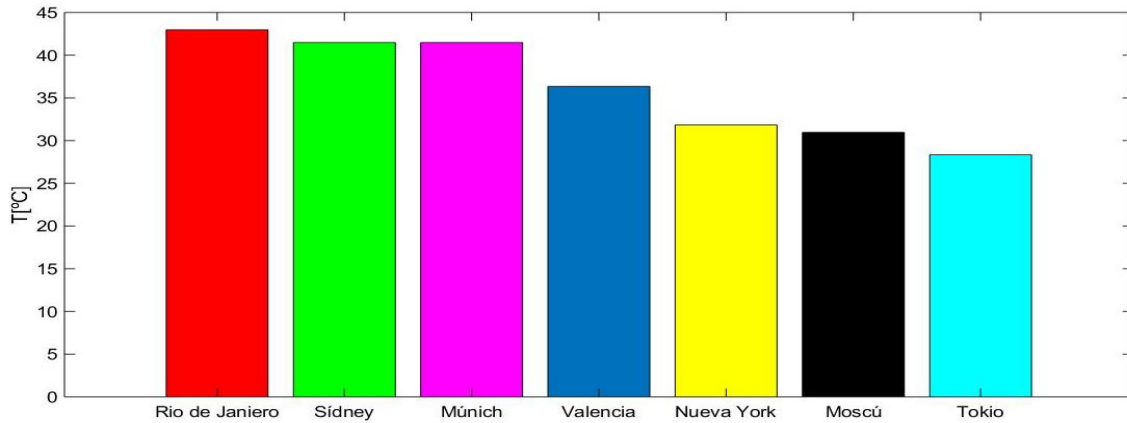


Fig.4.13 Temperaturas medias a la salida del colector (punto 2) en las distintas ciudades para la velocidad de flujo U_2 .

Con las temperaturas del bulbo seco halladas a la salida del colector, es decir, del punto 2, se realizan los cálculos de la capacidad máxima de secado media de forma análoga al caso anterior utilizando el mismo método mostrado en la Fig.4.11, expresándose los resultados en la tabla 4.10.

TABLA 4.10 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE SECADO MEDIA PARA VELOCIDAD DE FLUJO U_2 EN LAS DISTINTAS CIUDADES

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
<u>Datos de partida</u>							
$T_{bulboseco1}[^{\circ}\text{C}]$	16.63	23.48	17.89	25.24	19.75	20.51	18.31
$\varnothing_1[\%]$	53.5	76.08	64.33	63.73	61.67	82.64	67.25
$T_{bulboseco2}[^{\circ}\text{C}]$	36.34	42.98	30.96	41.48	41.48	28.34	31.82
$\varnothing_3[\%]$	100						
<u>Resultados</u>							
$\omega_1 = \omega_2 \left[\frac{kg_v}{Kg_a}\right]$	0.0063	0.0139	0.0082	0.0129	0.0089	0.0125	0.0089
$h_2[\frac{kJ}{kg}]$	52.75	79.06	52.23	74.98	64.64	60.53	54.68
$\omega_3 \left[\frac{kg_v}{kg_a}\right]$	0.0135	0.0209	0.0133	0.0197	0.0167	0.0156	0.0140

Capacidad máxima de secado media: $\omega_3 - \omega_1 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$	0.0071	0.0071	0.0051	0.0068	0.0079	0.0030	0.0051
--	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Para el gasto másico de vapor de agua absorbido por el aire en el secadero, se calcula el gasto másico de aire seco que circula por el colector para la velocidad de flujo U_2 mediante la ecuación (4.11) y a continuación, haciendo uso de la ecuación (4.12) y de la capacidad máxima de secado media obtenida para cada ciudad en la tabla 4.10 se obtiene los gastos másicos de vapor de agua absorbido en el secadero para las distintas ciudades mostrados en la tabla 4.11.

TABLA 4.11 GASTO MÁSIICO DE VAPOR DE AGUA ABSORBIDO EN EL SECADERO PARA VELOCIDAD DE FLUJO U_2 EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Gasto másico de vapor de agua $\left[\frac{kg_v}{s} \right]$	$4.80 \cdot 10^{-5}$	$4.70 \cdot 10^{-5}$	$3.40 \cdot 10^{-5}$	$4.55 \cdot 10^{-5}$	$5.25 \cdot 10^{-5}$	$2.03 \cdot 10^{-5}$	$3.43 \cdot 10^{-5}$

Los resultados de los gastos másicos de vapor de agua absorbido en el secadero para las distintas ciudades para la velocidad de flujo U_2 , se muestran en la Fig.4.14.

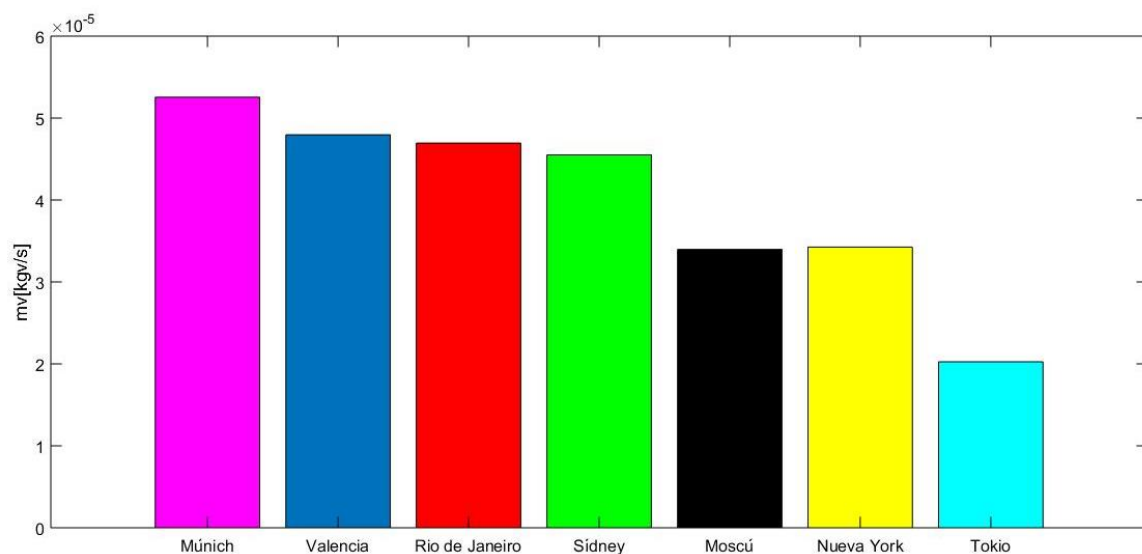


Fig.4.14 Gastos másicos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U_2 .

4.2.2.- Cálculo de la capacidad máxima de secado en función del tiempo.

A continuación, se estudia la capacidad máxima de secado en función del tiempo para ambas dos velocidades, pudiendo obtener, para un momento puntual del día, esta propiedad. Se calcula utilizando la misma metodología del diagrama psicrométrico, tal y como se ha realizado anteriormente, pero con cada valor en cada instante. Los valores de partida están recopilados en la tabla 4.1 y en la tabla 4.2 en el caso de la primera velocidad y, en la tabla 4.1 y tabla 4.4 en el caso de la segunda. Se calcula la relación de humedad, tanto inicial como final, en cada instante, que se representa en la Fig.4.15 para el caso de la primera velocidad y, en la Fig.4.17 para el caso de la segunda velocidad. Para las distintas ciudades la capacidad máxima de secado será la diferencia entre dichas curvas.

4.2.2.1.- Cálculo de la capacidad de secado en función del tiempo para la velocidad $U_1 = 0.56 \text{ m/s}$.

En el caso de la primera velocidad, se obtiene la relación de humedad inicial y final para las distintas ciudades en cada instante para el día tipo del mes escogido anteriormente, representando los resultados en la Fig.4.15.

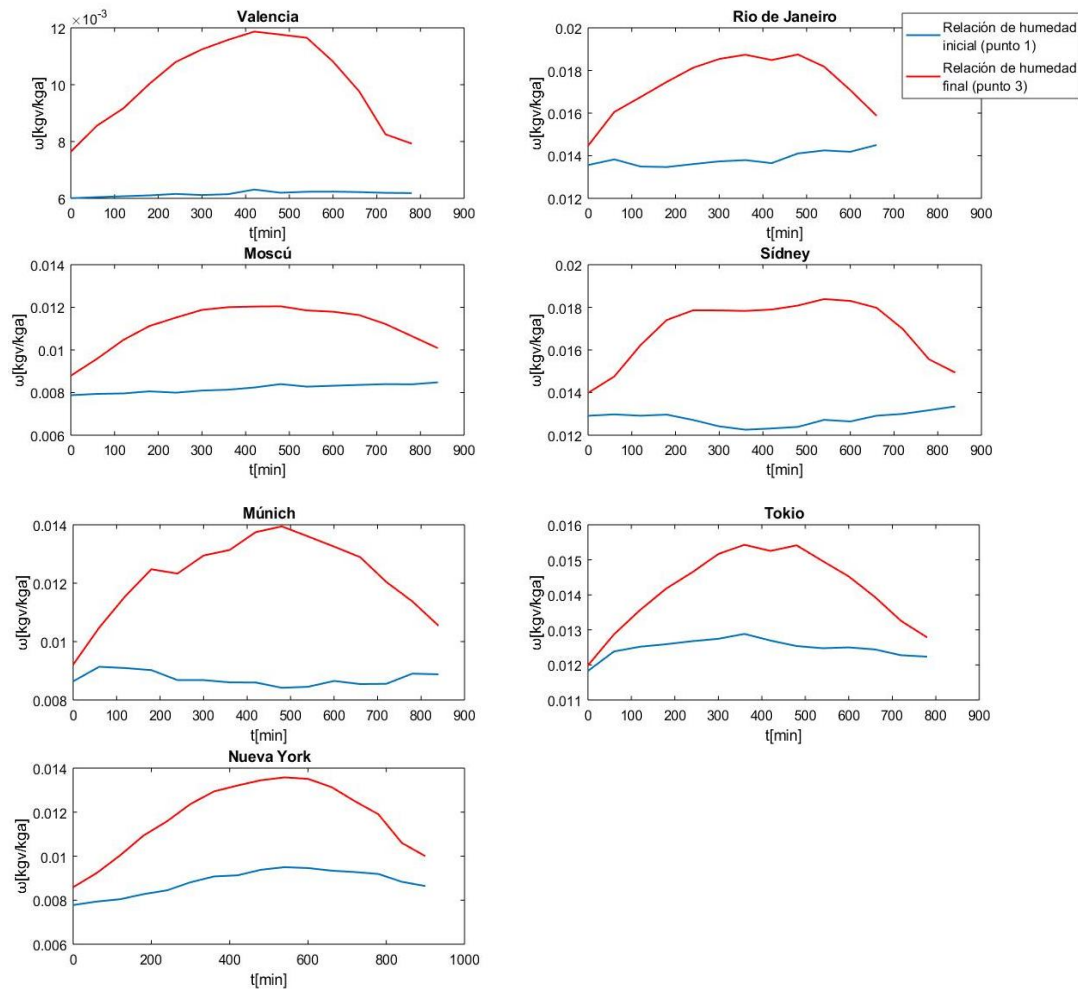


Fig.4.15 Evolución de las relaciones de humedades inicial y final en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo del aire U_1 .

Hallando el incremento entre la relación de humedades inicial y final se calcula la capacidad máxima de secado en función del tiempo para las distintas ciudades, mostrándose en la Fig.4.16.

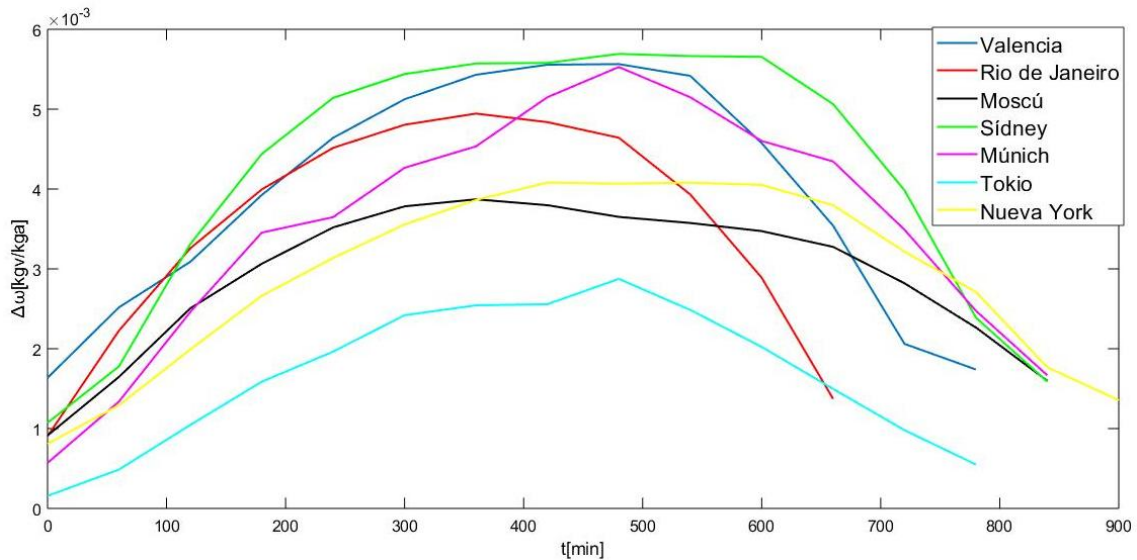


Fig.4.16 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_1 .

Se observa que la capacidad máxima de secado varía de la misma forma que el ciclo solar, siendo esta propiedad más alta en los puntos donde la potencia térmica es mayor y, por lo tanto, donde la temperatura es mayor y la humedad relativa es menor como se puede apreciar en la tabla 4.8. Dependiendo, por tanto, la hora en la que se realice el proceso de secado en las microalgas variará la ciudad en la que se tendría mayor capacidad máxima de secado, esto es consecuencia del ciclo de temperaturas a la salida del colector (Fig.4.3), y del ciclo de humedad relativa que presenten. Exceptuando algunos instantes concretos, se puede observar como la que más capacidad de secado posee a lo largo del ciclo es Sídney y le sigue, por orden descendiente, Río de Janeiro, Valencia, Múnich, Nueva York, Moscú y, en último lugar, Tokio.

4.2.2.2.- Cálculo de la capacidad de secado en función del tiempo para la velocidad $U_2 = 0.25 \text{ m/s}$.

Se realizan los cálculos utilizando la misma metodología para la segunda velocidad obteniendo a relación de humedad inicial y final que se muestran en la Fig.4.17.

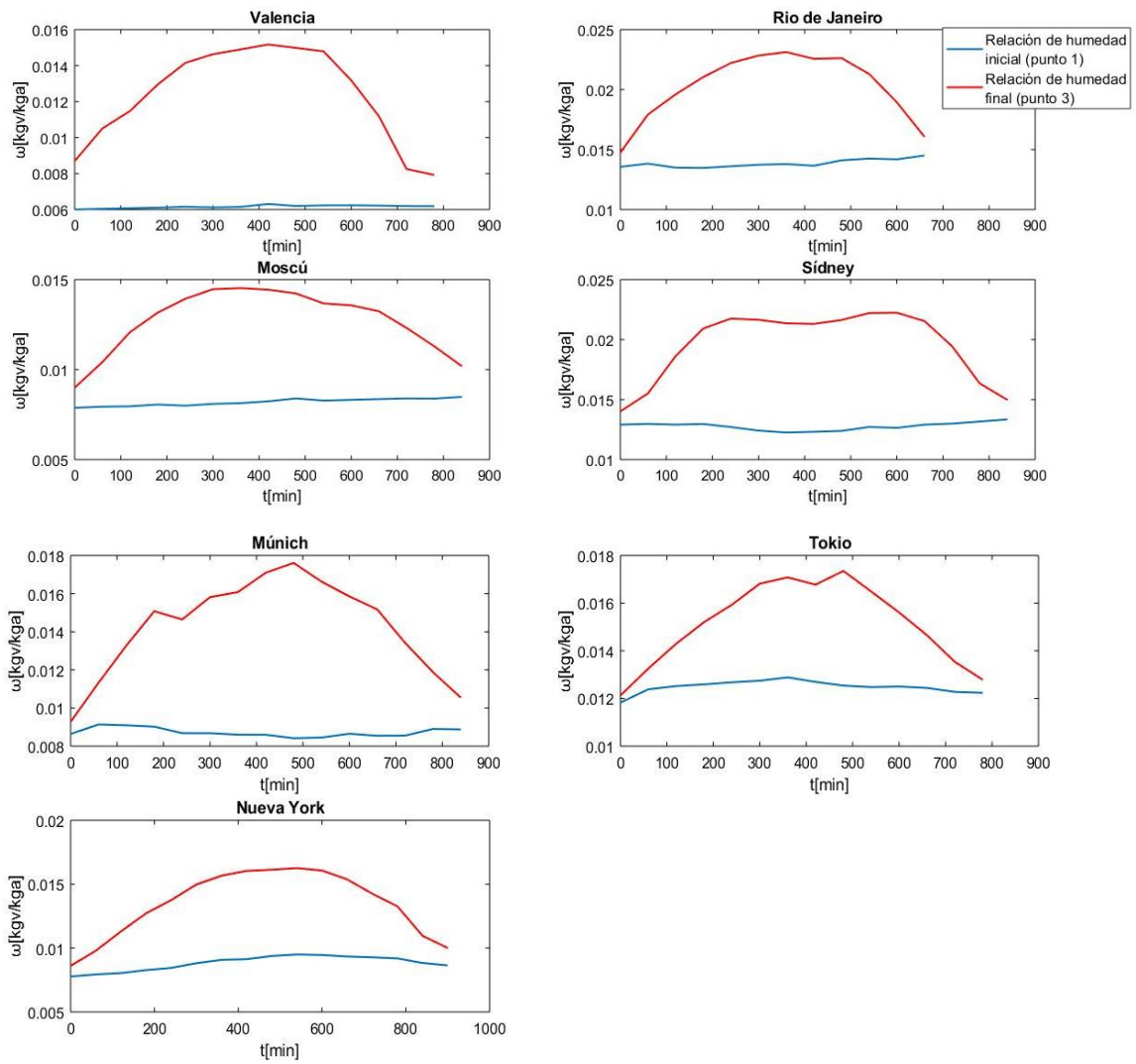


Fig.4.17 Evolución de las relaciones de humedades inicial y final en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo del aire U_2 .

Hallando el incremento entre la relación de humedades inicial y final se calcula la capacidad de secado máxima para las diferentes ciudades, mostrándose el resultado en la Fig.4.18.

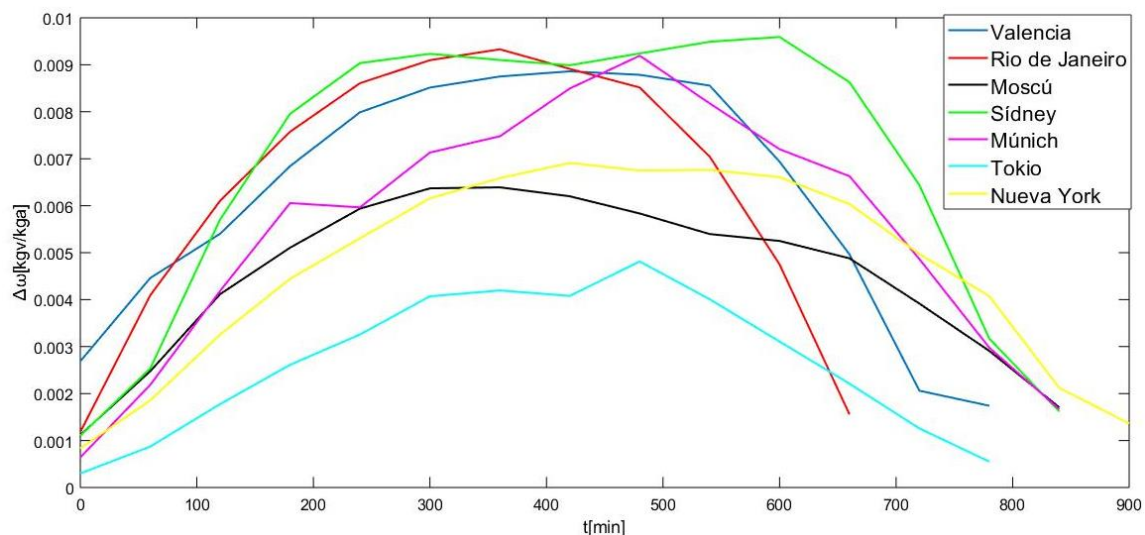


Fig.4.18 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U_2 .

Se llega a la conclusión que efectivamente la temperatura a la salida del colector es un factor muy importante a tener en cuenta, pero no concluyente, hace falta tener en cuenta la humedad relativa que se encuentra en el aire a la entrada del dispositivo. Cuanto menor sea esta, mayor será su capacidad máxima de secado y, por lo tanto, mayor será el gasto másico de agua absorbido en el secadero y, además, cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del dispositivo, es decir lo que se caliente el aire, aumentará también la capacidad máxima de secado y el gasto másico de agua absorbido en el dispositivo y, por lo tanto, su cinética de secado será más rápida.

Comparando la Fig.4.12 con la Fig.4.14 y, también la Fig.4.16 con la Fig.4.18, se puede observar como la influencia de la velocidad del flujo del aire afecta a la capacidad máxima de secado en las microalgas. Al encontrarse, en ambos casos, con las mismas condiciones a la entrada del colector, el único factor que varía es la temperatura a la salida de este, siendo esta mayor cuanto menor sea la velocidad de flujo introducido, tal y como hemos visto anteriormente. Por tanto, cuánto menor velocidad de flujo posea, mayor será su capacidad máxima de secado.

4.3.- Estudio de la influencia de la presión del fluido de trabajo en la capacidad máxima de secado.

En los casos anteriores de estudio se ha supuesto que el dispositivo se encontraba a la presión ambiente, es decir, a 1 atmósfera de presión, pero se quiere determinar la influencia que tiene la presión a la que se encuentra el fluido a la entrada del dispositivo para la capacidad de secado de las microalgas. Para ello, se mantiene la velocidad de flujo del aire constante a una velocidad de $U_1 = 0.56 \text{ m/s}$ variando, únicamente, el factor presión, pudiendo así analizar su influencia.

El diagrama psicrométrico mostrado en la Fig.4.11 ya no será factible para este caso, ya que sólo es válido para la presión atmosférica. Para este análisis se ha hecho uso de una

librería C++ de Matlab llamada Coolprop la cual contiene todas las propiedades de los fluidos y las ecuaciones psicrométricas.

Haciendo uso de CoolProp, se determinan los siguientes resultados de capacidad máxima media y en función del tiempo, para cada una de las presiones analizadas.

4.3.1.- Estudio de la capacidad máxima de secado para $p_1 = 50$ bares.

En primer lugar, se incrementa la presión hasta p_1 obteniendo la capacidad máxima de secado en función del tiempo, como se muestra en la Fig.4.19.

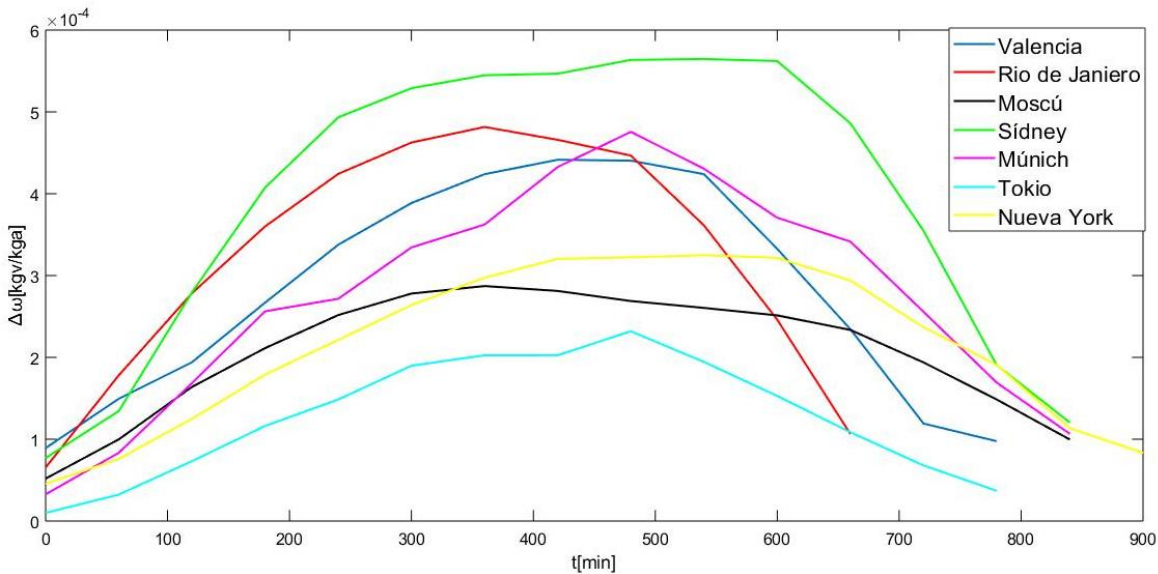


Fig.4.19 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U1 a una presión de entrada de 50 bares.

Se calcula utilizando la misma metodología la capacidad maxima media de secado para las distintas ciudades, mostrandose en tabla 4.12.

TABLA 4.12 RESULTADOS CAPACIDAD MÁXIMA DE SECADO PARA FLUJO DE AIRE U1 A PRESIÓN DE 50 BARES.

Ciudad	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Capacidad máxima de secado media:							
$\omega_3 - \omega_1 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$	0.00027	0.00035	0.00019	0.00042	0.00050	0.00010	0.00019

Aplicando la ecuación (4.11) y (4.12) se obtiene los gastos máscicos de vapor de agua absorbido en el secadero solar si este se encontrara a una presión p_1 , tal y como se muestra en la tabla 4.13.

TABLA 4.13 GASTO MÁSIKO DE VAPOR DE AGUA ABSORBIDO EN EL SECADERO PARA VELOCIDAD DE FLUJO U1 A UNA PRESIÓN DE ENTRADA DE 50 BARES EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Gasto másiko de vapor de agua $\left[\frac{kg_v}{s}\right]$	$4.11 \cdot 10^{-6}$	$5.27 \cdot 10^{-6}$	$2.82 \cdot 10^{-6}$	$6.22 \cdot 10^{-6}$	$7.45 \cdot 10^{-6}$	$1.58 \cdot 10^{-6}$	$2.88 \cdot 10^{-6}$

Los resultados de los gastos másikos de vapor de agua obtenidos en la tabla 4.13 se muestran en la Fig.4.20.

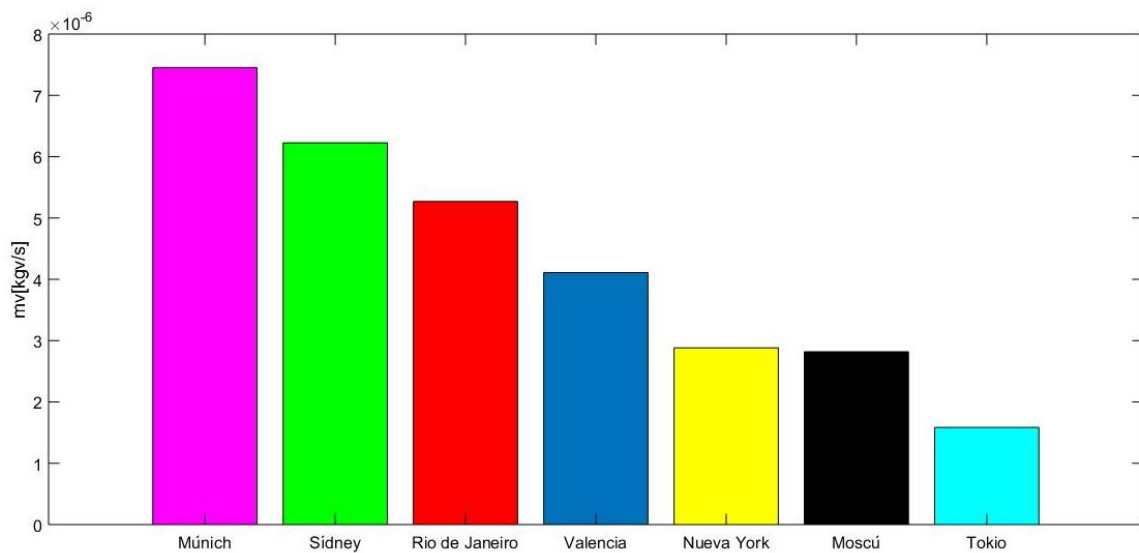


Fig.4.20 Gastos másikos de vapor de agua absorbido en el secadero en distintas en las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U1 a una presión de entrada de 50 bares.

4.3.2.- Estudio de la capacidad de secado para $p_2 = 0.01$ bares.

En el siguiente caso de estudio para la misma velocidad de flujo del aire a la entrada del colector, se disminuye la presión hasta p_2 obteniendo, en primer lugar, la capacidad máxima de secado para las distintas ciudades en función del tiempo mostrándose en la Fig.4.21.

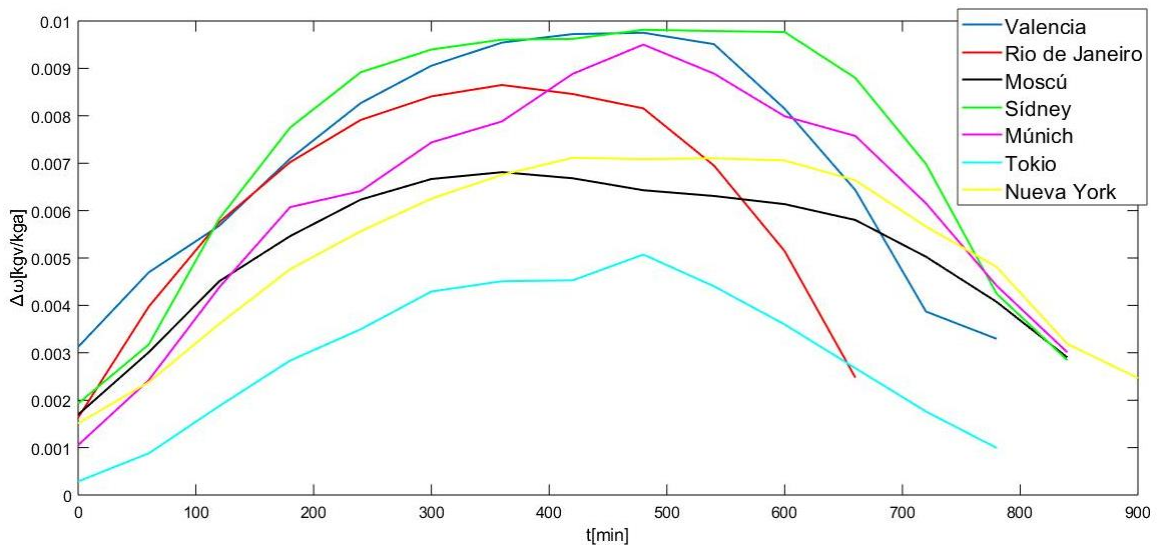


Fig.4.21 Capacidad máxima de secado en función del tiempo en las distintas ciudades para una velocidad de flujo U1 a una presión de entrada de 0.1 bares.

Se calcula utilizando la misma metodología la capacidad maxima media de secado para las distintas ciudades, mostrandose en tabla 4.14.

TABLA 4.14 RESULTADOS CAPACIDAD MÁXIMA DE SECADO PARA FLUJO DE AIRE U1 A PRESIÓN DE 0.01 BARES.

Ciudad	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Capacidad máxima de secado media:							
$\omega_3 - \omega_1 \left[\frac{kg_v}{kg_a} \right]$	0.0071	0.0068	0.0049	0.0079	0.0097	0.0026	0.0049

A continuación, aplicando la ecuación (4.11) y (4.12) se obtiene los gastos máscicos de vapor de agua absorbido en el secadero solar si este se encontrara a una presión p_2 , tal y como se muestra en la tabla 4.15.

TABLA 4.15 GASTO MÁSCICO DE VAPOR DE AGUA ABSORBIDO EN EL SECADERO PARA VELOCIDAD DE FLUJO U1 A UNA PRESIÓN DE ENTRADA DE 0.01 BARES EN LAS DISTINTAS CIUDADES.

	Valencia	Rio de Janeiro	Moscú	Sídney	Múnich	Tokio	Nueva York
Gasto máscico de vapor de agua							
$\left[\frac{kg_v}{s} \right]$	$1.00 \cdot 10^{-4}$	$8.73 \cdot 10^{-5}$	$6.78 \cdot 10^{-5}$	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$3.39 \cdot 10^{-5}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$

Los resultados de los gastos máscos de vapor de agua obtenidos en la tabla 4.15 se muestran en la Fig.4.22.

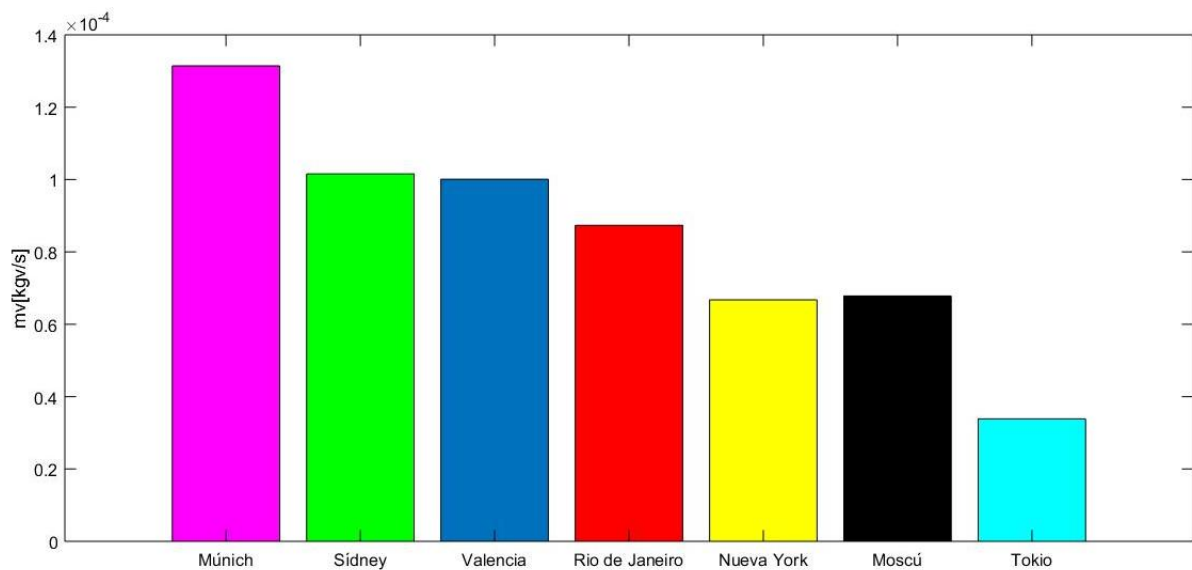


Fig.4.22 Gastos máscos de vapor de agua absorbidos en el secadero en distintas en las distintas ciudades para la velocidad de flujo del aire U1 a una presión de entrada de 0.01 bares

Realizando una comparación entre la capacidad máxima de secado en función del tiempo para las distintas presiones a las que se encuentra el fluido representadas en la Fig.4.19 y Fig.4.21 y, cotejando los resultados obtenidos de la capacidad máxima media de secado para ambas presiones recopilados en la tabla 4.12 y tabla 4.14, se llega a la conclusión que, cuanto más baja sea la presión del aire en el secadero solar, mayor será la capacidad máxima de secado que posea el aire para la absorción del agua en las microalgas y, por tanto, mayor será el gasto máscico de vapor de agua absorbido, tal y como se puede comprobar comparando la tabla 4.13 con la tabla 4.15 y la Fig.4.20 con la Fig.4.22.

5.- PRESUPUESTO

En este apartado se especifican los costes asociados a la elaboración del estudio y a la implementación del mismo.

Los costes se subdividen en;

- La mano de obra que hará falta para la concepción del proyecto, la dirección y, el montaje y puesta en marcha del dispositivo de secado.
- El material necesario para llevar a cabo todo el proceso de secado.
- Las licencias de software que se emplearán para su puesta en marcha.

5.1.-Mano de obra

La mano de obra se divide en ingenieril, supervisión y técnica

TABLA 5.1 COSTES DE MANO DE OBRA.

Tipo de mano de obra	Cantidad [horas]	Coste unitario [€/h]	Coste total [€]
Ingenieril	320	14.00	4480
Supervisión	245	28.00	6860
Técnica	168	9.00	1512
Subtotal			12852

5.2.-Material

TABLA 5.2 COSTES DE MATERIAL.

Material para la implementación del sistema	Concepto	Cantidad	Coste unitario [€/u]	Coste total [€]
Transductor de humedad y temperatura PCE-P18-3	Sensor de temperatura	1	146.29	146.29
	Sensor de humedad relativa			
Secadero solar indirecto	Secadero solar	1	1010.00	1010.00
Regulador de impulso neumático SMC VBAT05AF-SV-Q, 3/8 No	Regulador de presión	1	374.07	374.07
Medidor de caudal hidráulico Parker UCC FM.26 222 119, BSP 1/2, 2L/min, 20L/min	Medidor de flujo de masa	1	339.97	339.97
Balanzas electrónicas Kern EMS 6K1, Balanza Electrónica, 6kg, 1 g, 160 x 160mm, conteo de piezas, 1.4kg, +35°C, +5°C	Balanza	1	146.13	146.13
Microalgas no tratadas	Microalgas	4 kilos	7 / kilo	28.00
Piranómetro LP PYRA 03 Kit de Radiación Solar Global (Watt/m2)	Piranómetro		590.00	590.00
Subtotal				2634.46

5.3.-Licencias de Software.

TABLA 5.3 COSTES DE LICENCIA DE SOFTWARE.

Licencia de software	Tipo	Cantidad	Coste unitario [€/u]	Coste total [€]
Matlab R2017b	Licencia standard anual	1	800	800
Subtotal				800

5.4.- Presupuesto final.

TABLA 5.4 COSTE FINAL

Tipo de coste	Coste total [€]
Mano de obra	12852
Material	2634.46
Licencias de software	800
TOTAL	16286.46

6.- IMPACTO SOCIO-ECONOMICO.

En la actualidad, el hecho de cultivar microalgas para la producción de biodiésel es un proceso delicado. Se trata de cultivar algas que contengan un alto porcentaje en lípidos o azúcares que harán, posteriormente, más fácil la elaboración de biodiésel a partir de las mismas.

La evolución que ha experimentado esta idea en los últimos años sugiere un futuro muy prometedor, tanto por la idea en sí como por los avances tecnológicos para tal objetivo, a pesar de las dudas que genera la implantación a escala industrial.

Las ventajas que la implantación de esta tecnología tiene son evidentes, podemos destacar el hecho de que no ocupa tierras destinadas a cultivos de abastecimiento de comida, tiene una tasa de crecimiento muy superior al de las plantas terrestres, también son muy buenas en la colaboración del tratamiento de aguas residuales y, además, se pueden cultivar todo el año, según [17]

En cuanto al impacto social del cultivo de las microalgas se puede entender que podría ser muy positivo, y ofrecer oportunidades a los países en vías de desarrollo, donde se podría implantar esta industria, debido a razones climáticas y económicas.

Esta tecnología puede ofrecer la posibilidad de que se realice un desarrollo en el mundo rural a través de la creación de puestos de trabajo, tanto especializado como no especializado, y, por otra parte, también podría suponer que países en vías de desarrollo pudieran disponer de una fuente de energía barata e inagotable que ayudase a su mejora y progreso.

La rentabilidad económica, sin embargo, supone el principal inconveniente en la producción de biodiesel de 3ª generación, y aún no se han aclarado las dudas de si estos serán capaces de reemplazar a los combustibles fósiles. El alto grado de humedad en las algas supone un hándicap en cuanto a su manipulación y transporte, el hecho de que todavía sea una tecnología en desarrollo y, su alto coste en comparación con los combustibles tradicionales hace necesario, a día de hoy, una serie de exenciones fiscales para poder ser tenidos en consideración. La disminución de su coste de producción es otro de los retos para hacerlos viables, y es aquí, donde este trabajo acerca del secado de las microalgas a través de una energía renovable e inagotable como es la energía solar puede ayudar a que esta tecnología sea más rentable y, por tanto, que sea más factible su implantación a nivel global.

7.-CONCLUSIONES

Este trabajo pone de manifiesto el estudio de la cinética de secado en las microalgas mediante modelos cinéticos basados en estudios experimentales realizando un análisis de la influencia en la cinética de secado de distintos parámetros y condiciones en las que se encuentren las microalgas.

Después del análisis realizado en la metodología para la determinación del modelo más correcto para describir la relación de humedad en las microalgas en función del tiempo para el caso de estudio de la cinética de secado mediante energía solar, se concluye que el más exacto es el Modelo de Wang and Singh, para temperaturas por debajo de cincuenta grados centígrados.

Una vez escogida la metodología que se emplea para dicho estudio, se analiza la cinética de secado para distintos puntos geográficos, pudiéndose observar que la temperatura a la que se encuentra el aire a la entrada del secadero solar es un factor fundamental a tener en cuenta, pero no el único, por lo que, a través de un estudio psicrométrico de la capacidad máxima de secado, se ha determinado el gasto másico de vapor de agua absorbido en el secadero pudiéndose apreciar que la humedad relativa a la que se encuentre el aire a la entrada es, a su vez, otro de los factores fundamentales a tener en cuenta. Por todo esto, hay que concluir que cuanta menor humedad relativa y mayor temperatura tenga el aire, tanto a la entrada como a la salida del colector, más rápido será el proceso de secado en las microalgas.

También se ha realizado un análisis de la influencia tanto de la velocidad de flujo, como de la presión a la que se encuentre el aire a la entrada del secadero solar, pudiendo determinar que cuanta menor velocidad de flujo se encuentre con la menor presión posible, más rápido será el secado de las microalgas.

Por todo lo anterior de todas las ciudades analizadas, la ciudad más adecuada, por ser la que menos tiempo emplea en el proceso de secar la misma cantidad de microalgas, es Rio de Janeiro en el mes de agosto.

7.-BIBLIOGRAFIA.

- [1]” Los biocombustibles a partir de micro algas”, *Sitiosolar.com*, 2013. [en línea]. Disponible en: <http://www.sitiosolar.com/los-biocombustibles-de-microalgas/>
- [2] “Tipos de biocombustibles”, *energiasrenovablesinfo.com*, 2015. [en línea]. Disponible en: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/tipos-biocombustibles/>
- [3] A. Cabrera Vázquez, “El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipos de partículas” Tesis profesional. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México, 2004. [en línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/
- [4] “Importancia del secado”, *secafrut.blogspot.com*. 2009. [en línea]. Disponible en: <http://secafrut.blogspot.com/2009/11/importancia-del-secado.html>
- [5] J.C. Moreno López, “Secado convectivo”, *prezi.com*. 2016. [en línea]. Disponible en: https://prezi.com/bz_gp_zd3fxb/secado-convectivo/
- [6] L. Blanco Cano, L. Valdecabres San Martín, “Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales”, *energía sin fronteras.org*, 2016. [en línea]. Disponible en: <https://energiasinfronteras.org/attachments/enlaces/GuiaSecadoV3.pdf>
- [7] M.L. Galicia Pineda, I. Zaldivar Coria, J.A. Hernández Ruiz, “Procesos de separación. Secador rotatorio”. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. [en línea]. Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/procesos/secado/equipo.html>
- [8] T. Viswanathan, S. Mani, K.C. Das, S. Chinnasamy, A. Bhatnagar, R.K. Singh y M. Singh, “Effect of cell rupturing methods on the drying characteristics and lipidcompositions of microalgae”, *Bioresource Technology*, 126, 131-136, 2012.
- [9] L. Blanco-Cano, A. Soria-Verdugo, L. M. Garcia-Gutierrez y U. Ruiz Rivas, “Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer”, *Applied Thermal Engineering*, 108, 1086-1094, 2016.

- [10] P.C. Panchariya, D. Popovic, A.L. Sharma, “Thin-layer modelling of black tea drying process”. *Journal of Food Engineering*, 52, 349-357. 2002.
- [11] I. Doymaz, “An experimental study on drying of green apples”. *Drying Technology*, 27, 478-485. 2009.
- [12] I. Zlatanovic, M. Komatina, D. Antonijevic, “Low-temperature convective drying of apple cubes”. *Applied Thermal Engineering*, 53, 114-123. 2013.
- [13] <https://energyplus.net/weather>
- [14] A. Givoni B, *Man, Climate and Architecture. Architectural Science Series*. Publishers. Ltd. London. 1976
- [15] J.D. Czajkowski y A.F. Gómez, *Diseño bioclimático y economía energética edilicia. Fundamentos y métodos*. Ed. UNLP, Colección Cátedra. La Plata, Arg. 1994
- [16] M.J. Moran y H.N. Shapiro, *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, 2ª edición/ correspondiente a la 4ª edición original, Barcelona: Editorial Reverté, 2005.
- [17] F. Follos Pliego, “Los biocombustibles (parte 3)”, 2013. [en línea]. Disponible en: <http://ferfollos.blogspot.com/2013/09/los-biocombustibles-parte-3.html>